

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”  
Теплоенергетичний факультет

---

Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

# Магістерська дисертація

на тему: «Моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях»

Студент групи ТР-71мн Вільда Дмитро Олексійович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник роботи к.т.н. Михайлова І. Ю. \_\_\_\_\_  
(вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Кількість сторінок 117

Кількість ілюстрацій 37

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ  
СІКОРСЬКОГО»**

Теплоенергетичний факультет

Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

"На правах рукопису"  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ О.В. Коваль  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
“ ” \_\_\_\_\_ 2019р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності - 122 Комп'ютерні науки та інформаційні технології  
за спеціалізацією - Геометричне моделювання в інформаційних системах  
на тему:

«Моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях»

Виконав: студент 6 курсу, групи ТР-71мн

Вільда Дмитро Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник

доц., к.т.н. Михайлова І. Ю.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ - 2019

**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”**

Факультет теплоенергетичний

Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

Рівень вищої освіти другий, магістерський

зі спеціальності - 122 Комп'ютерні науки та інформаційні технології

за спеціалізацією - Геометричне моделювання в інформаційних системах

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Коваль О.В. \_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали) (підпис)  
«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_

2019р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

\_\_\_\_\_  
Вільді Дмитру Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях

**Науковий керівник** Михайлова Ірина Юріївна, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року №\_\_\_

2. Строк подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження: програмне забезпечення для моделювання температурного режиму

4. Предмет дослідження: програмне забезпечення для моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях

5. Перелік питань, які потрібно розробити: розробка модуля для моделювання температурного режиму зв'язаних приміщень; інтеграція розробленого модуля в систему Jupyter; адаптація поліноміальної NARX моделі з оцінкою параметрів

методом ортогонального найменшого квадрату для симуляції температурного режиму приміщень.

6. Орієнтований перелік ілюстративного матеріалу: сучасні методи моделювання температурного режиму, сучасні системи моделювання температурного режиму, оптимальна модель чорного язика для моделювання температури, опис експерименту з моделювання температури, видалення аномалій у датасеті, моделювання температури методом поліноміальної NARX моделі з оцінкою параметрів методом ортогонального найменшого квадрату

7. Орієнтований перелік публікацій \_\_\_\_\_

**1. Вільда Д.О. / Моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях /**

**Вільда Д.О., Михайлова І.Ю. // Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики” (Київ, 24- 27 квітня 2018 р.): тези доп. / НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, ТЕФ – Київ, 2018. – С. 81.**

**2. Вільда Д.О. / Система оптимізації витрат енергії на підтримку температури в**

**розумному будинку / Вільда Д.О., Михайлова І.Ю. // Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики” (Київ, 23- 26 квітня 2019 р.): тези доп. / НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, ТЕФ – Київ, 2019. – С. 67.**

8. Дата видачі завдання « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строки виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання	30.09.18р.	
2	Аналіз вимог завдання, вибір методів і засобів розв'язання поставленої задачі	01.10.18р. — 31.01.18р.	
3	Підготовка матеріалів магістерської роботи	02.09.18р. — 11.05.19р.	
4	Підготовка публікацій	05.02.18р. — 31.05.19р.	
5	Доповідь на конференції	-	
6	Написання основних розділів автореферату	12.02.19р. — 25.05.19р.	

7	Захист програмного продукту	16.03.19р	
8	Передзахист	14.05.19р	
9	Захист	20.05.19р	

Студент

\_\_\_\_\_  
( підпис )

Вільда Д.О.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Науковий керівник

\_\_\_\_\_  
( підпис )

Михайлова І.Ю.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновку, переліку посилань з 35 найменувань, містить 37 рисунків, 3 таблиці. Повний обсяг магістерської дисертації складає 84 сторінок, з яких перелік посилань займає 4 сторінки.

**Актуальність теми.** Проблема оптимізації енерговитрат і контролю комунальних витрат у житлових будинках або технічних приміщеннях є наразі актуальною. Дослідження цієї проблеми можна побачити в багатьох наукових роботах. Вирішення цієї проблеми пропонують деякі програмні системи і бізнес-проекти. В усіх дослідженнях і програмних системах, в будь-якому випадку, першим етапом вирішення проблеми енерговитрат у будинку є моделювання температурного режиму приміщення для розуміння температурної поведінки приміщення і прийняття подальших рішень для оптимізації енерговитрат. Для цього потрібно обрати оптимальний спосіб моделювання температури. Тому актуальним є дослідження сучасних методів моделювання температури і створення власної моделі для моделювання температурного режиму для подальших досліджень оптимізації енерговитрат.

**Метою дисертації** є розробка програмної системи моделювання температурного режиму приміщення на основі black box моделі.

Для досягнення поставленої задачі були сформульовані наступні **завдання дослідження**, що визначили логіку дослідження та його структуру:

- проаналізувати існуючі моделі температурного режиму приміщень;
- проаналізувати існуючі методи моделювання температурного режиму приміщень;
- проаналізувати існуючі методи обробки даних для моделювання температурного режиму;

- визначити оптимальну модель для симуляції температури в зв'язаних приміщеннях;

- модифікувати існуючу модель температурного режиму приміщень;

- розробити програмне забезпечення, що реалізує запропоновану модель.

**Об'єктом дослідження** є програмне забезпечення для моделювання температурного режиму.

**Предметом дослідження** програмне забезпечення для моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях.

**Методи дослідження.** Розв'язання поставлених задач виконувалось з використанням наступних методів:

- метод моделювання температурної моделі black box;

- обробка вхідних даних для моделювання методом iForest;

- метод NARX моделі;

- метод поліноміальної NARX моделі з оцінкою параметрів методом ортогонального найменшого квадрату.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Найбільш суттєвими науковими результатами магістерської дисертації є:

- запропоновано спосіб моделювання температурного режиму зв'язаних приміщень шляхом використання методу поліноміальної NARX моделі з оцінкою параметрів методом ортогонального найменшого квадрату, що дозволило зменшити похибку моделювання на пікових інтервалах на 46%.

**Практичне значення одержаних результатів** моделювання температурного режиму полягає у розробці програмного модуля, який дозволяє моделювати температурний режим приміщення з використанням поліноміальної NARX моделі з оцінкою параметрів методом ортогонального найменшого квадрату.

**Ключові слова.** *МОДЕЛЮВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, TEMПЕРАТУРНА МОДЕЛЬ, BLACK BOX, ВИЗНАЧЕННЯ АНОМАЛІЙ, СИМУЛЯЦІЯ, NARX*

## ABSTRACT

The master's thesis consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references of 35 titles, 37 figures and 3 tables. The full volume of the master's thesis is 84 pages, of which the list of references occupies 4 pages.

**Relevance of the topic.** The problem of optimization of energy consumption and control of utility costs in residential buildings or technical premises is now relevant. The study of this problem can be seen in many scientific works. The solution to this problem is offered by some software systems and business projects. In all studies and software systems, in any case, the first step in solving the problem of energy consumption in the house is to simulate the temperature conditions of the room to understand the temperature behavior of the room and make further decisions to optimize energy consumption. To do this, you need to choose the best way to simulate the temperature. Therefore, it is important to study modern methods of temperature modeling and create your own model for temperature simulation for further research on energy optimization.

**The purpose of the thesis** is to develop a software system for simulating the temperature of the room on the basis of the black box model.

In order to achieve the set task the following research tasks were formulated, the logic of the research and its structure were determined:

- to analyze the existing models of the temperature regime of the premises;
- to analyze the existing methods of modeling the temperature regime of premises;
- to analyze the existing methods of data processing for modeling the temperature regime;
- to determine the optimal model for simulating temperature in related rooms;
- to modify the existing model of temperature regime of premises;
- to develop software implementing the proposed model.

**The object of the study** is the software for modeling the temperature regime



**The subject of the study** is the software for modeling the temperature regime in related premises.

**Research methods.** The solution of the set tasks was carried out using the following methods:

- The method of modeling the temperature model black box;
- Input data processing for iForest simulation;
- NARX model method;
- polynomial NARX model and orthogonal least square method of parameter estimation.

**Scientific novelty** of the obtained results. The most significant scientific results of the master's thesis is:

- the method of modeling the temperature regime of the connected rooms by using the method of polynomial NARX model and estimation of parameters by the method of orthogonal smallest square, which allowed to reduce the error of modeling at peak intervals by 46%.

**The practical value** of the obtained results of temperature mode modeling is in the development of a software module that allows you to simulate the temperature mode of the room using the polynomial NARX model and evaluation of parameters by orthogonal least squares.

**Keywords.** *MODELING, ENERGY EFFICIENCY, THERMAL MODEL, BLACK BOX, K-MEANS, HVAC, ANOMALY DETECTION, SIMULATION, NARX*

# ЗМІСТ

Вступ.....	10
1. Задача моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях.....	13
Висновки до розділу 1.....	14
2. Огляд сучасних досліджень методів та систем моделювання температурного режиму.....	15
2.1. Опис предметної області моделювання температурного режиму у зв'язаних приміщеннях.....	15
2.2. Методи моделювання температурного режиму в приміщеннях.....	16
2.2.1 Модель білого ящика.....	19
2.2.2 Модель сірого ящика.....	20
2.2.3 Модель чорного ящика.....	21
2.2.4 Недоліки та переваги різних методів моделювання температурного режиму.....	22
2.3. Огляд програмних рішень для моделювання температурного режиму в приміщеннях.....	24
Висновки до розділу 2.....	30
3. Моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях.....	31
3.1. Вибір оптимальної моделі чорного ящика для моделювання температури.....	31
3.2. Модель чорного ящика NARX.....	33
3.3. Знаходження і видалення аномалій у датасеті.....	34
3.4. Моделювання температури з використанням поліноміальної NARX моделі з оцінкою параметрів методом ортогонального найменшого квадрата.....	39
Висновки до розділу 3.....	42

4. Розробка системи моделювання температурного режиму у зв'язаних приміщеннях.....	44
4.1 Вибір засобів реалізації системи.....	44
4.2 Опис програмної реалізації системи.....	48
Висновки до розділу 4.....	51
5. Методика роботи користувача із системою моделювання температурного режиму.....	52
5.1. Вимоги до апаратного та програмного забезпечення.....	52
5.2. Інтеграція програмного модулю для моделювання температурного режиму в Jupyter.....	52
5.3. Приклад використання розробленого програмного модулю для моделювання температурного режиму.....	54
5.3.1 Використання розробленого програмного модулю для моделювання температурного режиму методом NARX моделі.....	55
5.3.2 Використання розробленого програмного модулю для моделювання температурного режиму методом поліноміальної NARX моделі.....	57
Висновки до розділу 5.....	58
6. Результати моделювання температурного режиму.....	60
6.1 Опис експерименту з моделювання температури.....	60
6.2 Моделювання температури зони дослідження NARX моделлю.....	64
6.3 Моделювання температури зони дослідження поліноміальною NARX моделлю.....	67
Висновки до розділу 6.....	69
Висновки.....	70
Список використаних джерел.....	72
Додаток А.....	76
Додаток Б.....	83

## ВСТУП

За даними Євростату [1] великий відсоток споживаної в домогосподарствах енергії припадає на опалення / охолодження житлової площі. Як видно з рисунка 1.1, темпи споживання енергії для опалення приміщень є значними, особливо в країнах з більш холодним кліматом. Тому розробка методів, спрямованих на скорочення енергоспоживання, залишається важливим завданням.

	Electricity	Derived Heat	Gas	Solid fuels	Oil & petroleum products	Renewables and Wastes
<b>EU-28</b>	<b>24.4</b>	<b>7.8</b>	<b>36.9</b>	<b>3.3</b>	<b>11.6</b>	<b>15.9</b>
Belgium	19.9	0.0	42.1	0.9	29.2	7.9
Bulgaria	41.0	14.4	2.6	6.7	1.2	34.1
Czech Republic	18.6	15.3	28.8	10.8	0.6	25.9
Denmark	19.8	37.7	13.9	0.0	5.2	23.4
Germany	19.6	7.9	39.4	0.9	20.6	11.6
Estonia	17.7	33.5	6.2	0.2	1.1	41.2
Ireland	25.4	0.0	21.1	13.7	38.1	1.7
Greece	40.1	1.2	7.7	0.0	29.5	21.4
Spain	39.8	0.0	23.1	0.5	18.3	18.4
France	34.4	3.1	30.3	0.1	14.4	17.7
Croatia	22.0	5.0	19.5	0.1	6.0	47.5
Italy	17.2	2.9	53.1	0.0	7.1	19.6
Cyprus	41.8	0.0	0.0	0.0	37.0	21.2
Latvia	13.5	32.3	9.3	1.0	4.5	39.4
Lithuania	16.6	32.4	10.1	4.0	3.3	33.6
Luxembourg	15.4	0.0	45.2	0.1	33.8	5.6
Hungary	15.3	8.0	45.7	2.0	1.0	28.1
Malta	69.5	0.0	0.0		23.9	6.6
Netherlands	19.8	3.0	72.0	0.0	0.4	4.8
Austria	24.2	12.7	19.1	0.3	16.3	27.4
Poland	12.6	19.7	17.6	33.4	3.0	13.8
Portugal	42.9	0.0	9.6	0.0	16.3	31.1
Romania	14.0	10.8	30.9	0.8	3.4	40.2
Slovenia	24.4	7.1	10.0	0.0	12.5	45.9
Slovakia	21.6	22.1	52.6	1.5	0.4	1.8
Finland	36.6	31.8	0.5	0.1	6.4	24.6
Sweden	51.3	34.9	0.4	0.0	0.3	13.0
United Kingdom	24.4	0.1	63.3	1.5	6.3	4.4
Norway	78.1	2.7	0.1	0.0	7.6	11.6
Serbia	40.5	13.7	5.7	8.3	2.2	29.5
Albania	50.6	0.0	0.0	0.0	18.9	30.6
Kosovo*	33.1	1.6	0.0	1.6	2.3	61.4
Moldova	11.4	10.0	17.2	2.4	5.6	53.4

Рисунок 1.1 — Споживання енергії для опалення приміщень у країнах Європи

Проблема енергоспоживання являється актуальною і для галузі будівництва, оскільки будівельний сектор є джерелом викидів парникових газів і найбільшим

споживачем енергії серед усіх секторів економіки. У 2018 р на його частку припадало 42% світових викидів CO<sub>2</sub> [2]. У Франції будівельний сектор становить 44% від загального споживання енергії [3]. Таким чином, зниження енергоспоживання в будівельному секторі може зробити істотний внесок у зниження енергоспоживання і викидів парникових газів. Також, навіть на ранній стадії проектування будівлі, забудовнику і його архітектору можуть знадобитися деякі дані стосовно теплових характеристик майбутньої будівлі. На початковому етапі будівництва про будівлю відомо небагато, але консультант по системі опалення, вентиляції і кондиціонуванню (HVAC) повинен бути впевнений, що зможе задовольнити потреби забудовника відносно мікроклімату і енергоспоживання в приміщенні. Тому розроблюються методи для оціночного розрахунку можливого мікроклімату і втрат енергії.

Енергоефективність у житловому секторі може бути досягнута за допомогою різних методів. Одним з можливих шляхів є підвищення теплоізоляції за рахунок використання більш якісних матеріалів і реконструкції будівель. Паралельно з цими технологіями для оптимізації енергоефективності часто можуть застосовуватися технології "розумного будинку". Розумний будинок — це будинок з високотехнологічними автоматизованими системами управління і контролю функцій освітлення, температури, мультимедіа, безпеки, управління вікнами і дверима, якістю повітря для досягнення комфорту користувача тощо [4].

Існуючі системи в розумному будинку дозволяють користувачеві самостійно управляти системами клімат-контролю в будинку, налаштовувати і самостійно приймати рішення стосовно ефективності їх роботи за допомогою застосунків на електронних пристроях, тим самим контролюючи комунальні витрати. Проблема полягає в тому, що ці системи руйнують концепцію розумного будинку, оскільки не являються розумними, тобто самостійно не приймають рішення на основі власного аналізу навколишнього стану, а лише управляються дистанційно користувачем. Виходить, що користувач самостійно приймає рішення про контроль клімату в домі, що може призвести до зайвих енергозатрат через некомпетентність останнього. Тому важливо заздалегідь інформувати користувачів про споживання енергії в їх будинках, щоб при необхідності можна було вжити заходів щодо зменшення розміру

комунальних платежів за електроенергію.

Саме тому актуальною є проблема моделювання теплової поведінки будівлі для аналізу кількості виробництва тепла, що буде першим кроком до подальшої оптимізації енерговитрат приміщення. Для її вирішення було запропоновано створити програмний модуль, який дозволяє виконувати симуляцію температурного режиму і надавати результати симуляції у вигляді графіків. Для розробки програмної системи було використано середовище візуального програмування Jupyter Notebook, мову програмування Python з використанням бібліотек Pandas, Sickit-learn, matplotlib, PyNeurGen.

Завдяки даному модулю користувач може самостійно обирати потрібні йому дані з температурними показниками приміщення для моделювання температури, а також бачити результати моделювання.

Пояснювальна записка представлена шістьма розділами. В першому розділі описана задача моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях. В другому розділі наведено огляд сучасних методів та систем моделювання температурного режиму. В третьому розділі описаний процес моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях, вибір оптимальної моделі для моделювання. В четвертому розділі описуються засоби розробки системи моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях. В п'ятому розділі описана методика роботи користувача із реалізованим модулем для моделювання температурного режиму у зв'язаних приміщеннях. В шостому розділі надано приклад моделювання температури в приміщенні за допомогою розглянутих та запропонованих методів.

# **1. ЗАДАЧА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В ЗВ'ЯЗАНИХ ПРИМІЩЕННЯХ**

Метою дисертаційної роботи є розробка програмної системи для моделювання температурного режиму з зв'язаних приміщеннях.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання дослідження, що визначили його логіку та структуру:

- проаналізувати існуючі моделі температурного режиму приміщень;
- проаналізувати існуючі методи моделювання температурного режиму приміщень;
- проаналізувати існуючі методи обробки даних для моделювання температурного режиму;
- визначити оптимальну модель для симуляції температури в зв'язаних приміщеннях;
- модифікувати існуючу модель температурного режиму приміщень;
- розробити програмне забезпечення, що реалізує запропоновану модель.

Об'єктом дослідження є програмне забезпечення для моделювання температурного режиму.

Предметом дослідження є програмне забезпечення для моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях.

На вході системи обирається датасет із даними температури з якого задаються параметри для моделювання температури.

На виході система генерує графік змодельованої температури, графік температури із тестових даних для порівняння результатів, а також значення середньої квадратичної похибки моделювання температури.

Користувачами системи є інженери і дослідники, які працюють в сфері оптимізації енергоспоживання та енергоефективності приміщень, та науковці, чії

дослідження пов'язані з моделювання температури і оптимізацією енергоспоживання.

## **Висновки до розділу 1**

У першому розділі було:

- 1) визначено мету дисертаційної роботи і сформульовані завдання для дослідження;
- 2) визначено об'єкт і предмет дослідження;
- 3) визначено, що система повинна мати на вході та виході;
- 4) визначено користувачів системи.



## **2. ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ**

У цьому розділі описується предметна область магістерської роботи і проводиться огляд існуючих методів і підходів до моделювання температурного режиму, а також огляд існуючих програмних засобів, які реалізують цю задачу.

### **2.1 Опис предметної області моделювання температурного режиму у зв'язаних приміщеннях**

Більшість методів оптимізації споживання енергії першим кроком обирають проектування теплової моделі для прогнозування внутрішньої температури будівлі [5]. Деякі види програмного забезпечення використовують теплове моделювання для оцінки продуктивності вентиляційної системи і в якості інструменту прогнозування використовують характеристики будівлі з точки зору енергоспоживання і температури для забезпечення комфорту мешканців будинку або працівників офісу.

Дуже часто виникають ситуації, коли моделювання температури необхідне на етапі проектування будинку, що дозволить виявити потенційну поведінку тепла при заданих параметрах, що може запобігти неефективності робіт HVAC систем і невдоволенню мешканців будинку. Симуляції «віртуального теплового прототипу» будівлі або теплової зони присвячена велика кількість досліджень [6-8], адже можливість передбачити робочі сценарії поведінки температури без дорогих фізичних прототипів і випробувань є актуальним завданням.

Використовуючи отримані результати моделювання температурного режиму робиться висновок про втрати електроенергії і приймаються рішення щодо можливості зміни роботи деяких пристроїв для зменшення витрат енергії. Подібне

рішення з проектуванням теплової моделі і її оптимізації для зменшення енерговитрат у будівлі пропонує бізнес-проект BuildingIQ [9].

## 2.2 Методи моделювання температурного режиму в приміщеннях

Однією з першочергових задач, що виникають при експлуатації будівлі є завдання підвищення її енергоефективності. У дослідженнях, які проводяться з цього питання, часто виникає завдання виконати теплове моделювання будівлі для аналізу її теплових характеристик або для передбачення поведінки температури в приміщенні. В останні роки було виконано цілий ряд робіт в області теплового моделювання будівель, які можна знайти в літературі [4,7,8,10]. Власне ці теплові моделі використовуються для моделювання температури в будівлях і для дослідження енергоефективності систем опалення [11].

Існує два відомих варіанти моделювання температури і енергоспоживання в домі. Один з них називається прямим методом. Він передбачає прямий математичний зв'язок між набором вхідних параметрів (наприклад, зовнішньою температурою) і вихідними параметрами (наприклад, споживанням електроенергії). У роботі [12] розглядаються варіанти цих методів. Однак, цей метод має декілька наступних недоліків:

- тимчасові залежності не моделюються;
- помилка прогнозування виходить за межі діапазону тренувальних входів.

Інший метод представляє собою ідентифікацію теплової моделі будинку, яка дозволить знаходити зв'язок між тепловими потоками та зміною температури. Розроблена модель повинна мати регульовані параметри, які відповідають різним кліматичним явищам або пристроям в будинку та навколо нього. Точно розуміючи динаміку зміни температури, можна оцінити найбільш важливі фактори споживання та виробництва енергії в будівлі [13].

У зв'язку з цим було розроблено багато моделей для підвищення енергоефективності будівель і моделювання температури. Але не всі ці моделі є ефективними і вони не завжди дають точний результат через особливості їх побудови

або наявність необхідних даних для моделювання. Отже, спочатку важливо проаналізувати різні підходи до моделювання температури, щоб розуміти в якому із випадків потрібно використовувати ту чи іншу модель з максимально точним результатом, адже питання підвищення енергоефективності будівель, питання економії витрат на опалення, воду і кондиціонування повітря є основними для населення [6].

При моделюванні важливим є вибір типу моделі. Використання неправильного типу моделі може привести до втрати обчислювальної потужності і часу, а також надати неякісні результати через нестачу даних.

Отже, виникає питання про те, яка типова структура необхідна для опису теплової поведінки будівлі, який набір даних потрібен для моделювання температури і чи потрібно, і, якщо так, то наскільки це ресурсозатратно, перероблювати модель для іншої будівлі.

Для того, щоб краще описати різні типи моделей і їх використання, спочатку розглянемо загальну структуру моделей.

В основі моделі лежить математичне регулювання зв'язку вхідних змінних, вихідних змінних і параметрів, яке називається структурою моделі. Вхідні змінні і параметри задаються аналітиком або іншими моделями або процесами. Вихідні дані доступні для інших моделей або для оцінки аналітиком. З іншого боку, структура моделі, як правило, залишається незмінною. Залежно від типу або фізичної значущості параметрів слід визначити наступні категорії моделей (рисунок 2.1) [14,15]

- модель white box – це фізична модель з виключно фізичними значущими параметрами (відображена внутрішня структура моделі);
- модель black box – це нефізична модель (наприклад, статистична/стохастична) без фізичних значущих параметрів;
- модель grey box – це суміш моделей white box і black box.

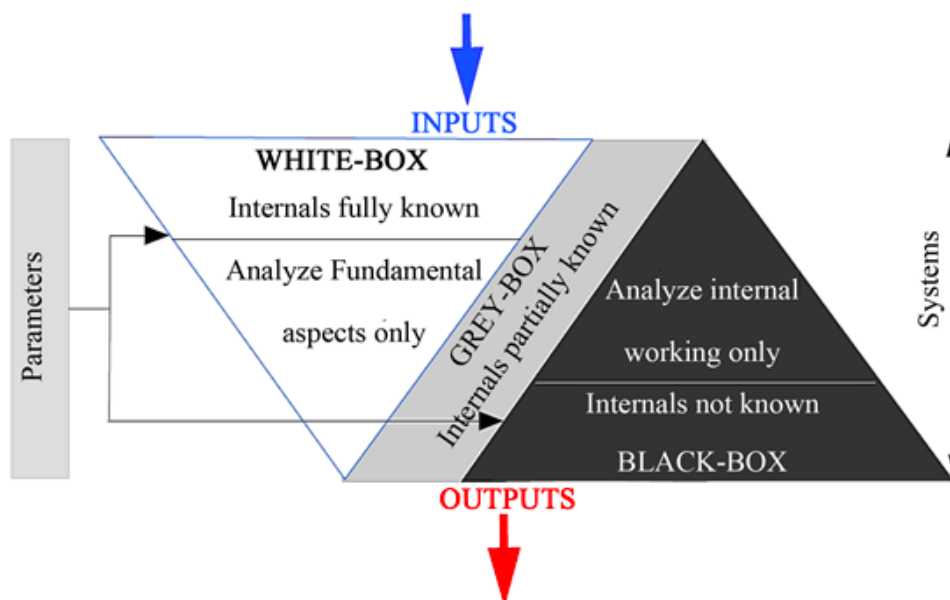


Рисунок 2.1 — Види методів моделювання температурного режиму

Як правило, якщо є достатньо інформації, щоб описати набір параметрів теплопередачі, акумулювання тепла і теплового потоку, а також відповідні параметри, які мають фізичне значення, то вони можуть бути описані за допомогою фундаментальних фізичних принципів. У цьому випадку, на питання про структуру моделі і параметрів відповідають моделі "білого ящика". В цьому підході моделі будуються з використанням апріорних знань про систему і рівнянь теплового балансу [7]. Моделі "білого ящика" можуть бути побудовані на основі попередньої інформації без необхідності будь-яких спостережень.

Однак, якщо явища будинку занадто складні для опису фізичними фундаментальними принципами, але їх можна спостерігати або вимірювати, то в цьому випадку використовуються моделі "чорного ящика" [8]. Ці моделі характеризуються поведінкою вводу-виводу без будь-якої докладної інформації про структуру.

Нарешті, якщо сукупність явищ житлового будинку одночасно спостерігаються і мають фізичні значення, то для оцінки потреби в тепловій енергії і прогнозування споживання тепла можна застосувати метод моделювання "сірий ящик" [8,16].

Підхід моделювання методом білого ящика ми можемо спостерігати в дослідженні [17]. Підхід моделювання методом сірого ящика ми можемо спостерігати

в дослідженні [5]. Також дослідження з моделювання методом сірого ящика спостерігаємо в [16]. Дослідження з використанням моделювання чорним ящиком показали, що таку модель частіше застосовують для моделювання температурного режиму [8,18].

### **2.2.1 Модель білого ящика**

White-box або метод прямого моделювання використовує детальні фізичні рівняння для моделювання компонентів будівель, підсистем і систем, щоб передбачити споживання енергії і комфорт в приміщенні. Детальні динамічні рівняння мають потенціал добре фіксувати динаміку будівлі, але їх розробка і розв'язування займає багато часу [19]. Моделі white box можна розрізняти за наступними видами рівнянь:

- статичні, динамічні моделі;
- лінійні, нелінійні моделі;
- диференційовані, безперервні, переривчасті моделі.

Використовуючи динамічне моделювання, необхідно спочатку зібрати необхідні дані, а потім передати їх в так званий механізм моделювання для докладного опису математичних моделей. Типові вхідні дані для інструменту динамічного моделювання можуть включати чотири групи параметрів такі, як погодні умови, опис будівлі, опис системи та компонентів системи.

Основна процедура розробки і моделювання моделі білого ящика наведені на рисунку 2.2 [20].

Однак моделювання методом білого ящика має ряд недоліків, головний з яких – складність моделі. Незважаючи на те, що такі інструменти моделювання як EnergyPlus[17], TRNSYS[21] використовують комбінації математичних рівнянь моделей білого ящика для обчислення енергоспоживання, ці інструменти вимагають детальної інформації про архітектурні та фізичні дані будівлі та багато вхідних параметрів для моделювання. Однак в більшості випадків ці параметри важко отримати, а іноді вони і зовсім відсутні. Крім того, в літературі зазначається, що велика кількість параметрів може бути джерелом помилок [22]. Ще до одного

недоліку моделювання білим ящиком можна віднести великі накладні витрати на обчислення. Складність моделі білого ящика означає, що вона вимагає потужних комп'ютерів для розрахунку і великого обсягу пам'яті.

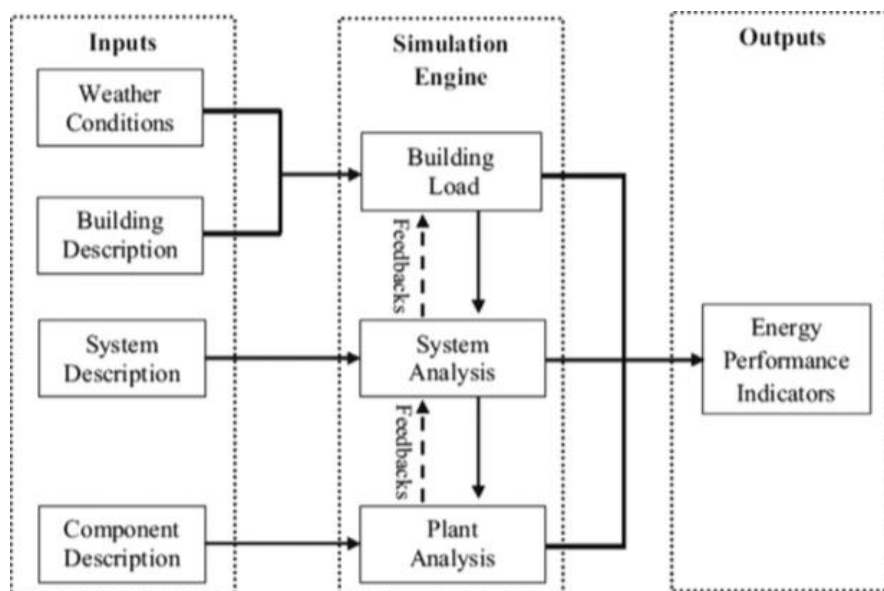


Рисунок 2.2 — Розробка і моделювання white box моделі

### 2.2.2 Модель сірого ящика

Часто в дослідженнях [5,16] використовують модель сірого ящика, оскільки дуже складно знайти таку кількість потрібних даних і, найчастіше, такий високий рівень деталізації фізичних процесів, як в моделюванні білим ящиком, не потрібен.

Моделі сірого ящика представляють собою змішані форми моделей білого та чорного ящика. В літературі часто зустрічається термін «гібридна модель». У цих моделях використовується спрощений фізичний опис для моделювання поведінки енергосистем будівель. Вони моделюють різні теплообмінники шляхом вводу обмеженого числа параметрів на основі RC-мереж [5]. У ці параметри входять: втрати тепла, напрямки і типи поверхні стін, а також тип ізоляції. Ще в 1951 році було вперше продемонстровано, що резисторно-конденсаторні мережі (RC) можуть точно відображати термодинаміку будівель [23]. З тих пір, RC-мережі використовуються для представлення термодинаміки будівель. У перші роки динамічного моделювання поведінки тепла, це був один з небагатьох способів представлення термодинаміки

будівель, але і сьогодні такі програми, як SYSLAB, використовують RC-мережі для побудови теплової моделі сірого ящика для подальших досліджень [5].

Сучасні методи проектування grey box моделей поведінки температури в приміщеннях так само використовують RC-мережу у вигляді математичних виразів (алгебраїчні, диференціальні рівняння), в яких можна виділити детерміновані і стохастичні параметри [16]. Тобто, ці параметри можуть бути як заздалегідь визначеними (теплопровідність стін), так і заздалегідь передбаченими або випадковими (температура зовні).

Однак моделювання цим методом має істотний недолік. Оскільки розроблена процедура моделювання повинна бути застосовна до різних архітектур будівлі, то модель білого і сірого ящика не являються оптимальними, оскільки обидві використовують у великій чи малій кількості інформацію про будівлю. Відповідно при зміні будівлі, процедура моделювання буде непридатна і необхідно буде заново будувати модель, що займає ресурси і час [8].

### **2.2.3 Модель чорного ящика**

Моделі чорного ящика фокусуються на пошуку зв'язків між вхідними та вихідними змінними незалежно від явищ в системі будівлі або випадкових величин, які впливають на ефективність підходу білого ящика. В чорному ящику параметри, як правило, автоматично регулюються [18]. Це автоматичне налаштування параметрів чорного ящика дає найбільшу перевагу в порівнянні з моделями білого ящика.

Моделі чорного ящика також відомі як статистичні моделі або інструменти машинного навчання. Вони можуть прогнозувати короткострокову перспективу внутрішньої температури, ґрунтуючись виключно на даних зовнішнього клімату і раніше зареєстрованих внутрішніх температурах. Таким чином, моделі чорного ящика є обчислювальними і ефективними з точки зору використання ресурсів і не вимагають ніякої фізичної інформації про приміщенні або склад будівлі. Статистичні моделі засновані на мінімальних витратах і не вимагають детальної параметризації на основі фізичних даних. Замість цього вони отримують уроки з даних минулих

часових рядів для виконання прогнозів, які можуть оновлюватися кожну годину [24] даних за періоди навчання та валідації [14].

Для прогнозування внутрішньої температури повітря можуть бути використані різні типи моделей чорних ящиків, найбільш поширеними з яких є нейронні мережі.

Приклади варіантів моделей представлені на таблиці 2.1 [25].

Таблиця 2.1. Види моделей чорного ящика

Тип моделі	Структура моделі	Оцінка параметрів	Приклад
Лінійна	Моделі ARMA, ARIMA та ін.	Метод найменших квадратів	Тепловий потік через плоску стіну
	Нейронні мережі	Ітеративна процедура	Нелінійні системи
Нелінійна	Поліноміальна	Метод найменших квадратів	Лінійні системи із статичними нелінійними параметрами на вході та виході

Дослідження [7, 8, 18] показали, що моделі чорного ящика є обчислювальними і ефективними з точки зору використання ресурсів [26] і не вимагають ніякої фізичної інформації про приміщенні або матеріал будівлі. Їх легше побудувати і застосовувати, навіть якщо у будівлі різко зміниться температурна поведінка або архітектура, оскільки моделі використовують дані в реальному часі і не спираються на фізичну інформацію.

#### **2.2.4 Недоліки та переваги різних методів моделювання температурного режиму**

У таблиці 2.2 наведені характеристики найважливіших властивостей моделей білого, чорного та сірого ящиків, які розглядалися вище.



Таблиця 2.2. Характеристики методів моделювання

Характеристика	White box	Black box	Grey box
Чітке розуміння набору параметрів для моделювання	Відсутнє	Присутнє	Відсутнє
Необхідність у зміні структури моделі для інших типів приміщень	Присутня	Відсутня	Присутня
Детальні фізичні і архітектурні знання компонентів приміщення	Присутні у великій кількості	Відсутні	Присутні, але у меншій кількості
Формули для системи рівнянь	Присутні у великій кількості	Відсутні	Присутні у великій кількості
Швидкість роботи	Повільна	Швидше за всіх	Швидше за white box
Структура моделі	Присутня	Відсутня	Присутня
Вірогідність помилки результату моделювання	Найбільша, через високі вимоги до фізичних параметрів	Найменша з усіх, через відсутність вимог до фізичних параметрів	Менша, ніж у white box, в деяких випадках більша через вимоги до фізичних параметрів

З таблиці 2.2 можна побачити, що моделі білого ящика в своєму складі мають багато систем рівнянь через вимоги до великої кількості фізичних параметрів

приміщення. Такий підхід мав би зробити моделювання більш точним, але він призводить до зайвої складності моделі, адже деякі з параметрів дуже важко отримати [14]. Крім того, в дослідженнях припускається, що відсутність чіткого розуміння набору параметрів може призводити до їх надмірності, що в результаті призведе до помилки моделювання [22].

Моделі сірого ящика частіше використовуються в дослідженнях, оскільки не вимагають повної інформації про фізичні параметри приміщення [27], тому і працюють швидше. Однак їх недолік в тому, що як і в моделях white box, їх рівняння описують конкретне приміщення, оскільки у своїх параметрах вони використовують фізичну інформацію про будівлю. Тому для моделювання теплової зони з іншими фізичними параметрами необхідно буде витратити ресурси на побудову нової моделі [7].

Дослідження [7, 28] показали, що моделі чорного ящика працюють точніше, швидше і не вимагають ніякої фізичної інформації про приміщення або матеріал будівлі. Моделі black box фокусуються на пошуку зв'язків між вхідними та вихідними даними незалежно від явищ в системі будівлі або випадкових величин, які впливають на ефективність підходу білого та сірого ящика [18].

Виходячи з перерахованих вище характеристик різних підходів до моделювання, було вирішено використовувати підхід black box.

## **2.3 Огляд програмних рішень для моделювання температурного режиму в приміщеннях**

Моделювання «віртуального теплового прототипу» приміщень — це можливість отримати сценарії поведінки температури без використання фізичних приборів і без витрачання часу і ресурсів на реальні випробування, що є перевагою таких програмних рішень.

Одне з таких рішень пропонує Міністерство енергетики США. **EnergyPlus** — це програма для моделювання теплового та енергетичного режиму в будівлях для проведення досліджень поживання енергії.

EnergyPlus бере свій початок в програмах BLAST і DOE-2, які були розроблені і випущені в кінці 1970-х і початку 1980-х років в якості інструментів для моделювання енергії і навантаження. Основною відмінністю програм є метод розрахунку навантаження – DOE-2 використовує ваговий коефіцієнт приміщення, тоді як BLAST використовує метод теплового балансу [17]. Їх цільова аудиторія – інженери-проектувальники або архітектори, які хочуть підібрати відповідне обладнання HVAC, зробити дослідження з модернізації для аналізу вартості життєвого циклу обладнання, оптимізувати енергетичні характеристики будинку. Однак через те, що кожна з цих програм складається з сотень підпрограм, які працюють разом для моделювання потоків тепла, такий підхід приводив до «спагетті коду». Тобто якщо розробнику потрібно було доповнити або змінити одну з програм для конкретної задачі моделювання, йому необхідно було мати багаторічний досвід роботи програмістом, знання коду, не пов'язаного з його завданням (через «спагетті»), і (часто для спонсорів) це призводило до зайвих витрат часу і грошей [17].

Через дороге обслуговування і нескінченні модифікації, Міністерство енергетики прийняло рішення об'єднати модулі і команди цих двох програм для створення EnergyPlus. Як і батьківські програми, EnergyPlus є програмою аналізу енергії і моделювання теплового навантаження (рисунок 2.3). Використовуючи підхід моделювання білого ящика, програма ґрунтується на описі будівлі користувачем з точки зору її фізичної структури, пов'язаних з нею механічних систем і архітектурних особливостей. EnergyPlus розрахує нагрівальне і охолоджувальне навантаження, необхідні для підтримання заданих значень температури, а також багато інших деталей моделювання, необхідних для підтвердження того, що моделювання відображає реальні значення. Система використовує програму EP-Launch для перегляду даних, як редактор вхідного і вихідного файлів, щоб відкрити електронну таблицю для відображення результатів постпроцеса, Excel або браузер для файлу табличних результатів.

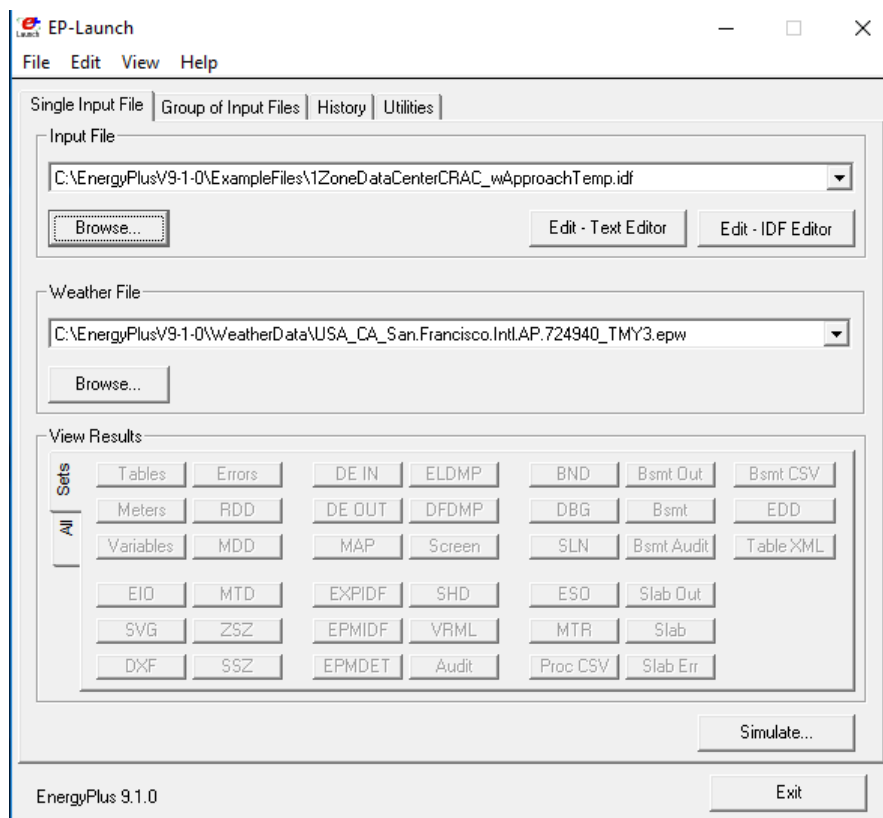


Рисунок 2.3 — Інтерфейс EnergyPlus

Дана програма дозволяє:

- працювати з різними програмами моделювання;
- інтегрувати отримані результати в інші програмні середовища для подальших досліджень;
- моделювати поведінку температури для різного виду приміщень;
- використовувати набір інструментів для відображення результатів.

Однак, EnergyPlus має кілька суттєвих недоліків, через які вона не має широкого використання.

1. В той час як багато графічних програм, наприклад SolidWorks, допомагають користувачеві у виправленні помилок введення, роблять прості перевірки на введені дані, EnergyPlus не перевіряє прийнятність та діапазон введених даних [23], що говорить про те, що система працює за стандартом «сміття всередині – сміття зовні», що є неприйнятним для інженера або архітектора при проектуванні будинків.

2. Моделі в EnergyPlus будуються методом сірого або білого ящика, що незручно при зміні архітектури або температурної поведінки будівлі, адже тоді потрібно перебудовувати модель.

Більш широке поширення серед користувачів отримав бізнес-проект BuildingIQ. BuildingIQ є наступним поколінням інтелектуальних будівельних інструментів. Австралійська і каліфорнійська компанії розробили алгоритмічну платформу управління енергією, яка оптимізує систему HVAC для максимальної ефективності [29].

Для запуску своїх алгоритмів оптимізації вчені та інженери повинні створити точну математичну модель динаміки теплової та енергетичної складових будівлі. В алгоритмах використовується ця модель для виконання обмежених оптимізацій. Для цього в BMS систему розумного будинку підключаються модулі BuildingIQ для збору даних і побудови теплової моделі будівлі (рисунок 2.4). Після усунення сплесків та шуму в наборі даних через несправність датчиків [7], система використовує рівняння для проектування теплової моделі. Потім шляхом введення даних про будівлю у ці рівняння, алгоритм налаштування моделі знаходить найбільш підходящі параметри, які мінімізують похибку між фактичними даними і оцінкою моделі.

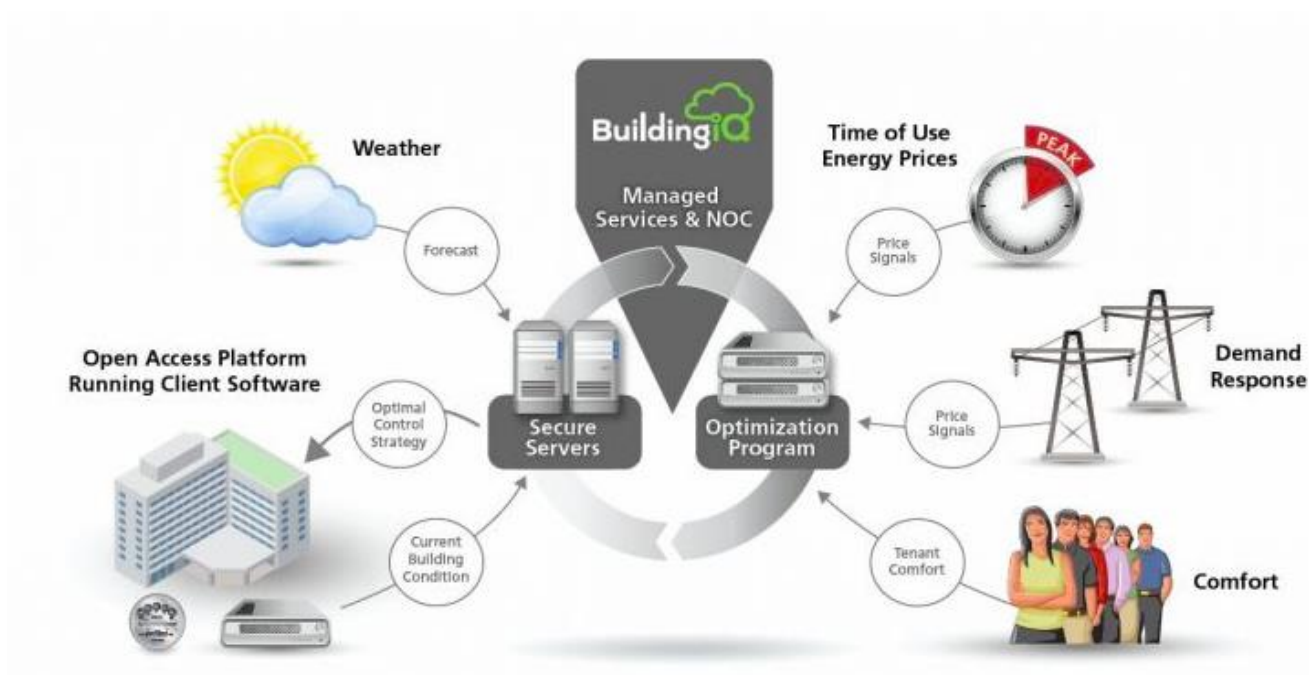


Рисунок 2.4 — Збір даних у BuildingIQ

Пошук оптимальних параметрів моделі виконується кожні 3-4 години. Процес оптимізації зупиняється, коли відсоток помилки буде менше або дорівнюватиме заданому розробниками. Після цього, коли система «впевнена» в тому, що результати симуляції енергозатрат практично збігаються з результатами в реальному будинку, робиться висновок, що модель побудована правильно, і тепер алгоритм, який використовується для пошуку оптимальних параметрів теплової моделі, використовується в подальшому процесі оптимізації, коли, замість коригування параметрів моделі з метою мінімізації помилок моделі, оптимізація коригує реальні температурні показники приміщення вже безпосередньо через BMS будівлі для мінімізації експлуатаційних витрат протягом наступних 24 годин [24]. BuildingIQ вже показав позитивні результати, дозволивши споживачам заощадити від 10 до 25% витрат на опалення і кондиціонування повітря [7] (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 — Результати роботи BuildingIQ

Отже, програма BuildingIQ дозволяє:

- не використовувати додаткове програмне забезпечення для моделювання температурної моделі;
- оптимізувати витрати енергії, а не тільки моделювати їх;

- використовувати дані в реальному часі;
- створювати тепловий прототип приміщення і тільки потім міняти роботу систем HVAC в приміщенні;
- використовувати модель виду black box, не спираючись на фізичні і архітектурні параметри будівлі.

Однак, такий недолік, як закритість проекту не дозволяє користувачеві вільно проводити експерименти з моделювання і відслідковувати побудову теплової моделі і результати її роботи, оскільки це все відбувається всередині системи, що може викликати недовіру до точності і адекватності роботи системи в деяких випадках.

Програмне забезпечення TRNSYS[21], розроблене у Франції – це графічне програмне середовище, що використовує комбінації математичних рівнянь для моделювання поведінки теплових та електричних енергетичних систем.

TRNSYS складається з двох частин. Перша – движок (ядро), який обробляє вхідний файл, надає інтерфейс для моделювання і будує графіки. Ядро також надає утиліти, які, в тому числі, визначають теплофізичні властивості, інвертують матриці, виконують лінійні регресії і інтерполюють зовнішні файли даних. Друга частина TRNSYS являє собою велику бібліотеку компонентів, кожна з яких моделює роботу однієї частини системи. Стандартна бібліотека включає близько 150 моделей, починаючи від насосів і закінчуючи багатозонними будівлями, вітряними турбінами і електролізерами, пристроями обробки метеорологічних даних (рисунок 2.6). Моделі побудовані таким чином, що користувачі можуть модифікувати існуючі компоненти або писати свої власні, розширюючи можливості середовища.

Програма TRNSYS дозволяє:

- використовувати власний графічний інтерфейс для моделювання даних;
- враховувати динамічні фізичні явища для моделювання;
- модифікувати вхідні дані для моделювання;
- перевіряти правильність вибору моделей і параметрів.

Однак, TRNSYS має кілька суттєвих недоліків:

- моделі в TRNSYS будуються методом білого ящика, що незручно при зміні архітектури або температурної поведінки будівлі, адже в такому разі потрібно перебудовувати модель;
- відсутність інформації варіантів модифікації вхідних даних для моделювання, що може призвести до невірних результатів.

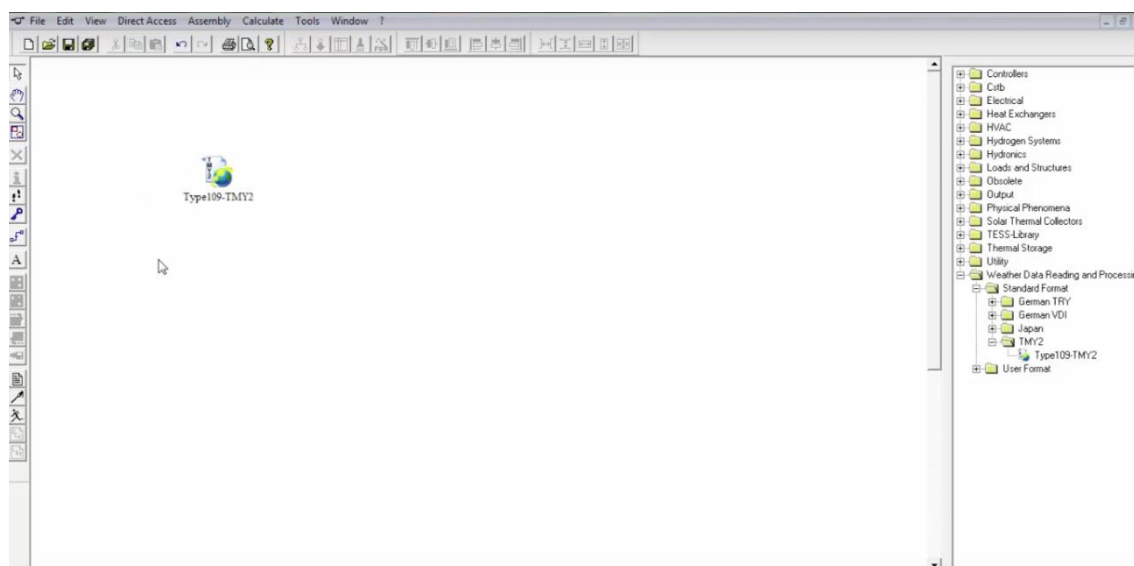


Рисунок 2.6 — Інтерфейс TRNSYS

## Висновки до розділу 2

У другому розділі було проаналізовано наступні елементи.

1. Проаналізовано сучасні методи моделювання температурного режиму у зв'язаних приміщеннях, такі як white box, black box та grey box моделі. Виявлено переваги і недоліки кожної з них, зроблено висновок, що найефективніша модель для даного дослідження – це black box модель.
2. Проаналізовано сучасні системи моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях і виявлено, що найбільше недоліків мають системи, які не використовують black box модель для моделювання температури. Але ті системи, що її використовують, закриті для дослідження, і не демонструють проміжний результат роботи, а одразу дають готову відповідь, що може викликати підозри щодо точності і адекватності роботи методів моделювання і оптимізації енергії.



### 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В ЗВ'ЯЗАНИХ ПРИМІЩЕННЯХ

#### 3.1 Вибір оптимальної моделі чорного ящика для моделювання температури

В попередніх розділах було досліджено три види моделей для моделювання температурного режиму і була обрана модель чорного ящика для подальших досліджень. Але залишилось відкритим питання, яку саме модель чорного ящика потрібно обрати. Тому, з метою визначити модель чорного ящика, яка буде давати максимально точні результати моделювання температури, було досліджено ряд наукових робіт, присвячених схожій проблемі моделювання температури в приміщеннях.

Метою дослідження [28] було визначення найкращої моделі з точки зору точності моделювання для надання допомоги дослідникам і фахівцям в прийнятті рішень про вибір і впровадження систем моделювання в будівлях. Метрикою, яка визначає точність моделювання в даному дослідженні, є середня абсолютна похибка (MAE), яка має формулу:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3.1)$$

де  $Y_i$  – фактичне значення,

$\hat{Y}_i$  – змодельоване значення температури,

$n$  – кількість даних.

Для дослідження було обрано такі моделі: модель білого ящика, реалізована в EnergyPlus [17], модель сірого ящика на основі RC-мережі [5] дистанційного керування R1C1, R2C2, R3C3 в Modelica, модель чорного ящика – модель авторегресії (NARX), реалізована в Matlab і модель нейромережі (NN) в Python.

Моделі і результати тренінгових наборів даних представлені в двох варіантах: перший – розрахунки на 3 дні роботи, другий – за 27 днів роботи з 21 березня по 17 квітня. Дослідження проводилися в чотирьох поверховому будинку університету, розташованому на території SDU Campus Odense, Данія, де було обрано приміщення, розташоване на другому поверсі. Зона дослідження мала площу 125 м<sup>2</sup> і використовувалася виключно працівниками закладу для виконання технічних робіт. Дані, які були зібрані в процесі дослідження, включали в себе: температуру повітря ззовні, сонячне випромінювання, температуру всередині приміщення, тиск повітря, кількість людей в приміщенні.

Результати оцінки точності моделей представлені на рисунку 3.1 [20].

Zone	Model	MAE [°C]		
		Training	Validation 27 days	3 days
Study zone	EP	0.265	0.526	0.529
	NARX	<u>0.050</u>	<u>0.212</u>	<u>0.115</u>
	NN	0.095	0.247	0.129
	R1C1	0.159	6.560	0.310
	R2C2	0.163	4.791	0.305
	R3C3	0.116	3.002	0.438

Рисунок 3.1 – Результати оцінки точності моделей

Таким чином, на підставі проведеного дослідження можна зробити висновок, що за 3 дні досліджень найменша середня абсолютна похибка була продемонстрована моделлю чорного ящика NARX. Протягом 27-денного процесу валідації модель NARX також найкраще підходить для області навчання і знову показує найменше середнє значення відносної похибки. Також, ґрунтуючись на попередніх дослідженнях і дослідженнях [30], можна сказати, що модель NARX є оптимальною моделлю для роботи з часовими рядами, тому було вирішено зосередитися на цьому типі моделі чорного ящика для моделювання температури у зв'язаних приміщеннях.

### 3.2 Модель чорного ящика NARX

NARX – це нелінійна авторегресійна рекурентна динамічна нейронна мережа, яка оцінює майбутні значення часового ряду на основі своїх останніх виходів і зовнішніх даних. NARX – нейронна мережа із тимчасовою затримкою вперед, в якій поточне значення виходу статичного сигналу ставиться в залежність від минулих значень вхідного і вихідного сигналів через відповідну нелінійну статичну функцію [31].

Дана модель може бути представлена наступним рівнянням [32]:

$$\hat{y}(t+1) = F \left( \begin{matrix} y(t), y(t-1), \dots, y(t-n_y), x(t+1), \\ x(t), x(t-1), \dots, x(t-n_x) \end{matrix} \right) \quad (3.2)$$

де  $F$  – деяка функція оцінки (sigmoid, tanh);

$\hat{y}(t+1)$  – прогноз вихідного значення  $y$  за час  $t+1$ ;

$y(t), y(t-1), \dots, y(t-n_y)$  – минулі значення часового ряду;

$x(t+1), x(t), x(t-1), \dots, x(t-n_x)$  – вхідні значення моделі NARX.

Модель має три шари: вхідний, прихований та вихідний. Графічне представлення моделі подано на рисунку 3.2:

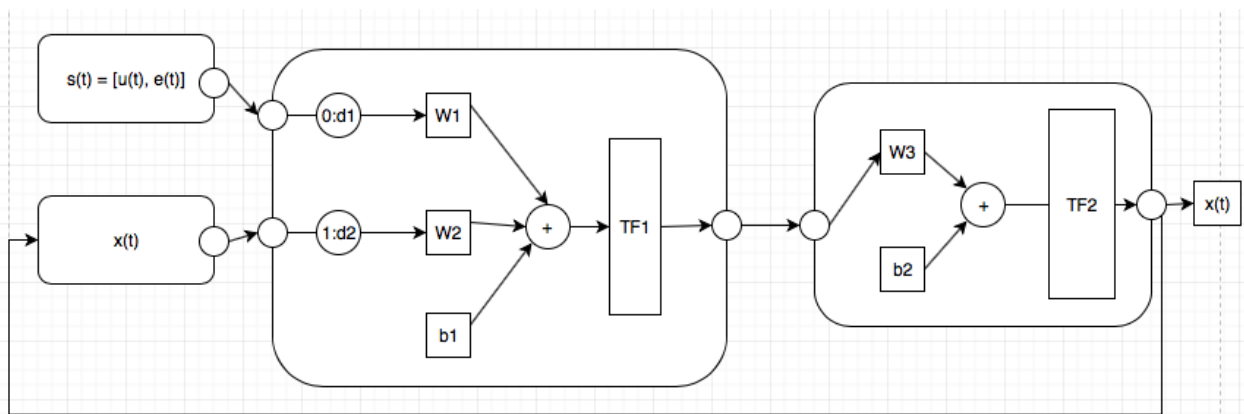


Рисунок 3.2 – Модель NARX

Ця схема описує наступне рівняння [32]:

$$x(t) = TF_2[W_3 * TF_1\{W_1 * (s(t), s(t-1), \dots, s(t-d_1)) + W_2 * (x(t-1), \dots, x(t-d_2)) + b_1\} + b_2] \quad (3.3)$$

де  $W1, W2, W3$  – ваги моделі;

$b1, b2$  – когнітивне спотворення;

$d1, d2$  – затримки часу в мережі;

$TF1, TF2$  – функції активації;

$s(t)$  – вхідні дані в мережу (масив вхідних сигналів) під час  $t$ ;

$x(t)$  – вихід у мережі.

NARX нейронні мережі складаються з простих з'єднаних елементів (що позначаються як нейрони), які працюють паралельно. Вихід кожного шару мережі проходить через фільтрацію зваженої суми його входів через, зазвичай, нелінійну функцію, тобто так звану функцію активації. Ваги, пов'язані із нейронами, коригуються на етапі підготовки (навчання) з метою скорочення конкретної вартісної функції, наприклад такої як MSE (mean squared error).

### 3.3 Знаходження і видалення аномалій у датасеті

Виявлення аномалій, відоме також як виявлення відхилень, являє собою процес аналізу даних, який використовується для виявлення типів аномалій, виявлених в наборі даних, і для визначення подробиць їх виникнення. Виявлення аномалій дуже важливе в сучасному світі, де великий обсяг даних унеможливорює ручне маркування відхилень. Часто в даних зустрічаються явища, які можуть викликати проблеми, такі як нелінійність і відхилення на етапі моделювання та оцінки, через [18]:

- перегрів в термостатичних експериментах;
- сонячне випромінювання, що потрапляє прямо на датчики температури;
- падіння на датчики тіні від навколишніх будинків, дерев, стовпів;
- технічні несправності датчика.

Ці причини можуть вказувати на явища, які можуть привести до виникнення труднощів при майбутньому моделюванні. Ці проблеми часто виникають в експериментальній установці, вимірювальному обладнанні або при обробці даних. Тому після збору даних в масив необхідно очистити їх від аномалій, як вказано в дослідженнях [9,14].

Для виявлення аномалій в даному дослідженні був обраний алгоритм iForest. Алгоритм був вибраний на підставі результатів дослідження з порівняння 14 алгоритмів за критеріями точності, надійності, часу обчислення на декількох датасетах [33]. Дослідження показало, що iForest є відмінним методом ефективної ідентифікації відхилень, який демонструє чудову масштабованість на великих масивах даних до одного мільйона зразків, а також знижує обчислювальні витрати і займає менше пам'яті.

Ідея цього алгоритму була запропонована Лю в [34]. Він використовував ізоляцію як спосіб "відокремити екземпляр від інших екземплярів" [Лю]. Загалом, для виявлення аномалій необхідно випадково згенерувати бінарні дерева, де кожен екземпляр буде рекурсивно виділений в прямокутники (рисунок 3.3). Дерево може знайти більш короткі шляхи до аномалії, так як в областях з аномаліями набагато простіше ізолювати об'єкти, що відрізняються від інших, в прямокутник, так як поруч немає інших об'єктів. Отже, коли ліс, що складається з випадкових дерев, в сукупності робить більш коротку довжину шляху для деяких конкретних точок, вони, швидше за все, є аномаліями.

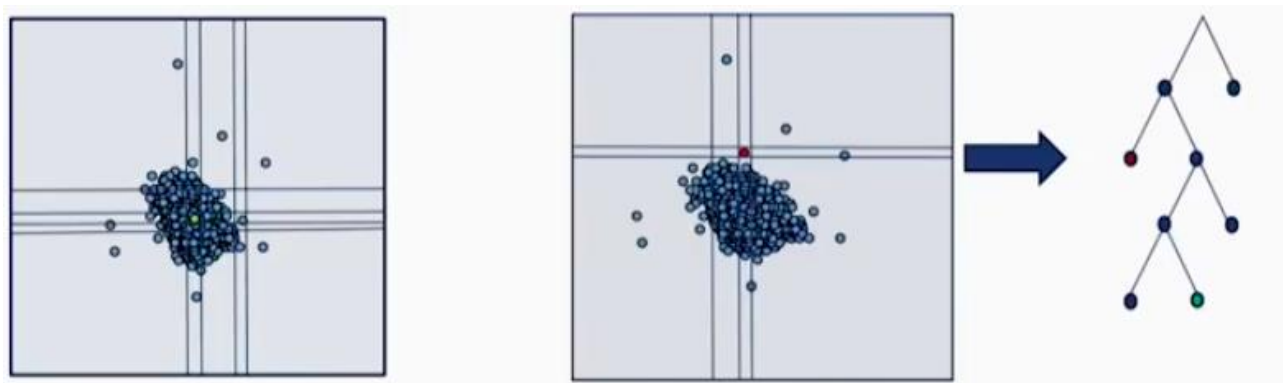


Рисунок 3.3 – Ізоляція об'єкту прямокутником

Алгоритм ізолюючого дерева (Isolation Tree) полягає в побудові випадкового бінарного дерева рішень. Коренем дерева є простір ознак; в черговому вузлі вибирається випадкова ознака і випадковий поріг розбиття, семплування проходить з рівномірного розподілу на відрізок від мінімального до максимального значення вибраної ознаки. Критерієм зупинки є збіг всіх об'єктів у вузлі, тобто дерево рішень

будується повністю. Стверджується, що аномальним точкам властиво опинятися в листі з низькою глибиною, тобто в листі, близькому до кореня, коли для розбиття на кластери нормальних даних, дереву потрібно побудувати ще кілька рівнів. При цьому кількість таких рівнів пропорційна розміру кластера, а отже, пропорційна і `anomaly_score` для точок в ньому. Це означає, що об'єкти з кластерів малих розмірів, які потенційно є аномаліями, матимуть `anomaly_score` нижче, ніж з кластерів нормальних даних. Як і у випадку з іншими методами виявлення аномалій, для прийняття рішень потрібна оцінка аномалій. У разі ізоляційних лісу вона визначається як:

$$s(x, n) = 2^{-\frac{E(h(x))}{c(n)}}, \quad (3.4)$$

де  $h(x)$  – довжина шляху спостереження  $x$ ,

$c(n)$  – середня довжина шляху невдалого пошуку в дереві бінарного пошуку,

$n$  – кількість зовнішніх вузлів.

Детальніше про оцінку аномалії і її компонентах можна прочитати в [34].

Кожному спостереженню присвоюється оцінка аномалії, і на її основі може бути прийнято наступне рішення:

- значення близько до 1 вказує на аномалії;
- значно менша оцінка, ніж 0,5, вказує на нормальні спостереження;
- якщо всі оцінки близькі до 0,5, то вся вибірка не має чітко виражених аномалій.

В даному дослідженні алгоритм iForest реалізований в Python з використанням бібліотек Keras і Tensorflow. Щоб видалити аномалії з двох наборів даних, було об'єднано два набори даних в один. Використовується команда `outliers_fraction` для надання алгоритму інформації про частку викидів, присутніх в наборі даних. Оскільки датчики часто є джерелом аномалій [18], було вирішено перевірити аномалії саме в показниках датчиків в наборі даних. Точніше, аномалії перевірялися на даних сенсорів, які вимірювали температуру стін ззовні приміщення, оскільки сонячне випромінювання ззовні, перегріваючи сенсор, може служити одним з джерел виникнення аномалій в показниках. Наприклад, за допомогою команди

`df['T6_2'].Description()`, що дає інформацію по колонці T6\_2, було виявлено одну екстремальну аномалію – максимальну температуру 68.55°C (рисунок 3.4).

```
count    2880.000
mean      29.477
std       12.074
min       17.490
25%       21.180
50%       23.970
75%       35.178
max       68.550
Name: T6_2, dtype: float64
```

Рисунок 3.4 – Аномалії в колонці T6\_2

Було встановлено значення параметра «`outlier_fraction = 0.03`» через велику кількість аномалій в датчику T6\_2, які показані на рисунку 3.5.

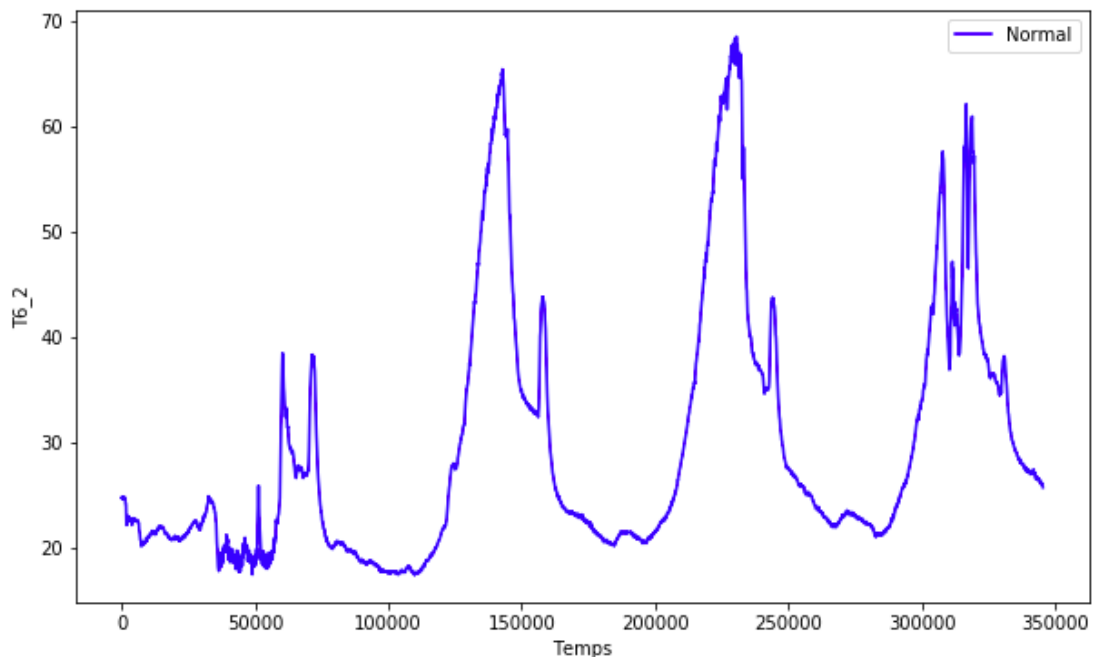


Рисунок 3.5 – Температура в сенсорі T6\_2

Використовуючи алгоритм виявлення аномалій iForest, можна візуалізувати аномалії в сенсорі T6\_2 (рисунок 3.6). Аномалії виділені червоним кольором.

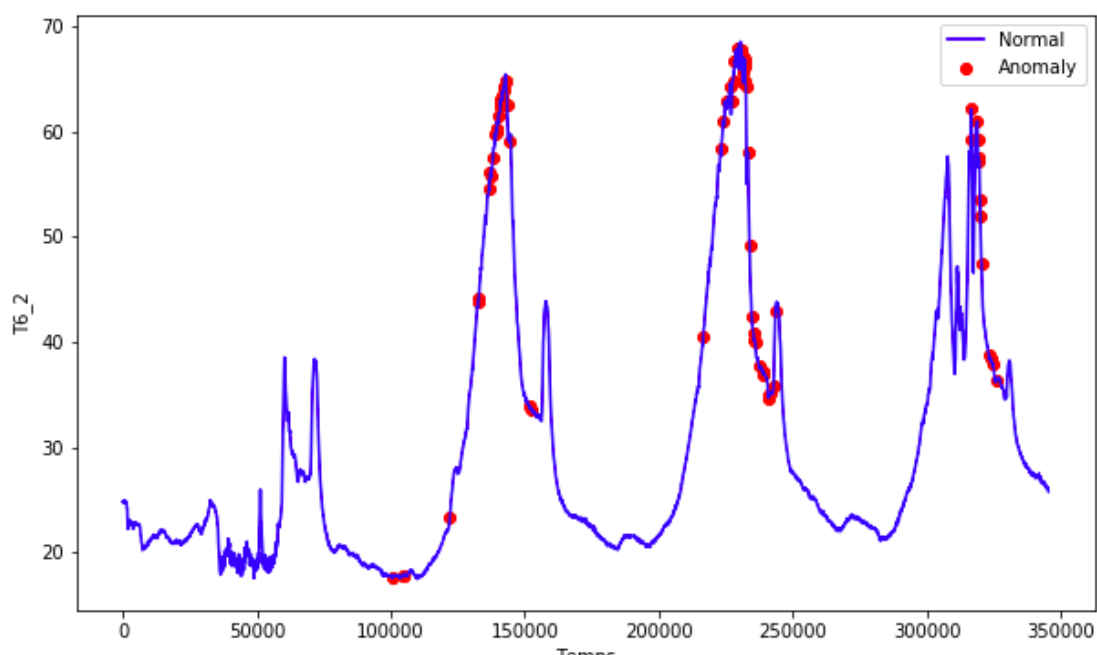


Рисунок 3.6 – Аномалії в сенсорі T6\_2

Для порівняння, було також використано алгоритм k-means для того ж набору даних. Цей алгоритм використовувався у вищеописаній системі BuildingIQ [7], але для даного випадку показав незадовільні результати визначення аномалій в порівнянні з алгоритмом iForest (рисунок 3.7).

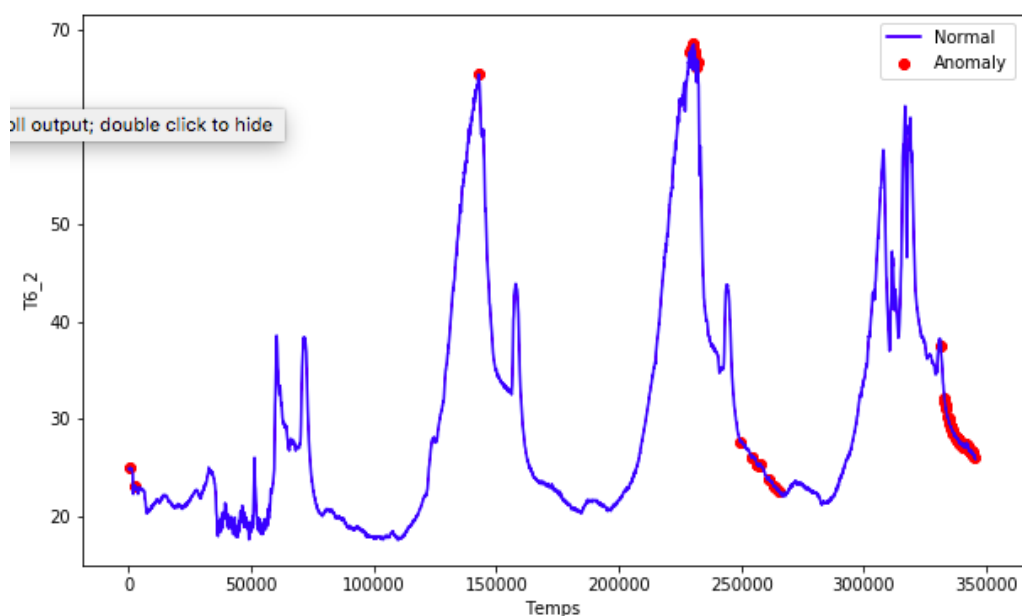


Рисунок 3.7 – Аномалії в сенсорі T6\_2 алгоритмом k-means



Отже, алгоритм iForest підтвердив свою надійність і був обраний для продовження дослідження.

Процес видалення аномалій дав наступні результати, які можна побачити на рисунку 3.8.

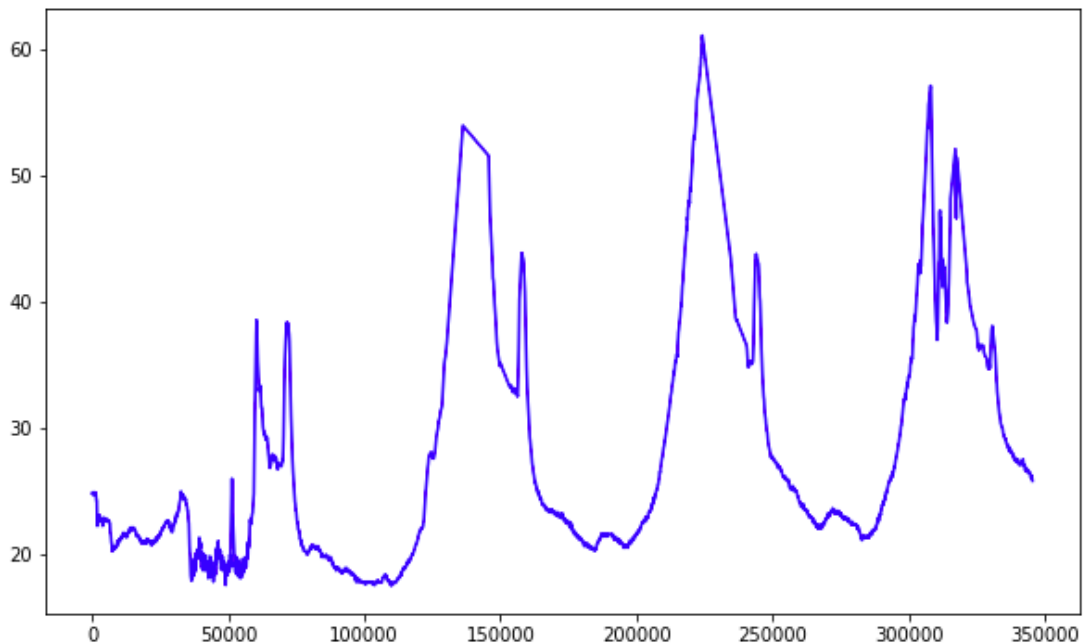


Рисунок 3.8 – Температура сенсора T6\_2 після видалення аномалій

З графіку видно, що алгоритм видалив пікові аномалії, що дає змогу точніше моделювати температуру на новому датасеті.

### **3.4 Моделювання температури з використанням поліноміальної NARX моделі з оцінкою параметрів методом ортогонального найменшого квадрату**

Алгоритм поліноміальної моделі NARX був запропонований Піродді [35].

Відповідно до алгоритму, загальну формулу (3.2) NARX моделі можна представити у вигляді поліному, в результаті чого можна отримати рівняння із регресорами – дані у минулих вхідних і вихідних виборках:

$$\hat{y}(t; \vartheta) = \varphi(t; \vartheta)^T \vartheta \quad (3.5)$$

Наприклад, квадратична модель NARX має наступну формулу:

$$y(t) = \vartheta_1 + \vartheta_2 y(t-1) + \vartheta_3 (u-t) + \vartheta_4 (u-t) + \vartheta_5 y(t-1)^2 + \vartheta_6 y(t-1)u(t-1) + \vartheta_7 y(t-1)u(t-2) + \vartheta_8 u(t-1)^2 + \vartheta_9 u(t-1)u(t-2) + \vartheta_{10} u(t-2)^2 \quad (3.6)$$

Для даної структури моделі проблема оцінки параметрів може бути тривіально вирішена за допомогою методу найменших квадратів, використовуючи структуру лінійної регресії моделі предиктора.

Але головна проблема полягає не в оцінці параметрів, а в підборі коректних умов поліноміального розширення для включення в модель.

Число членів поліноміального розширення швидко збільшується з порядком  $k$  розкладання і числом  $n$  аргументів, і важливо не переоцінювати  $k$  і  $n$ . Дійсно, компактний розмір моделі має вирішальне значення для достовірності оцінки параметрів і робастності моделі: занадто параметризовані моделі NARX можуть привести до ефективної підгонки оціночних даних, але не здатні вловити реальну динаміку базової системи;

Для оцінки адекватності структури даної моделі необхідно оцінити її параметри і виміряти її відповідність, як правило, на валідаційному наборі даних, відмінному від ідентифікаційного набору даних.

Однак не можна протестувати всі можливі структури, як це робиться для лінійних моделей (де кількість можливих моделей зазвичай досить невелика). Дійсно, якщо  $n$  – це число регресорів  $\varphi_i(t)$ , то число можливих моделей дорівнюватиме  $2^n - 1$ , що є досить великою кількістю в більшості практичних застосувань.

Більшість методів вибору структури ґрунтуються на ітеративному підході до побудови моделі (пряма регресія):

- починаючи з порожньої моделі, модель поступово збільшується, до неї додається по одному регресору за раз, поки не буде досягнуто заданого рівня точності;
- у фіналі додається регресор, який найбільше підвищує точність поточної моделі.

Така жадібна політика відбору неоптимальна, оскільки не гарантується, що вся процедура відбору буде приведена у відповідність до правильної структури моделі.

Простий спосіб вибрати, який регресор додати, - спробувати їх всі по одному:

- кожен раз попередньо доповнити модель одним регресором, виконати переоцінку параметрів і оцінити ступінь відповідності отриманої моделі;
- при випробуванні всіх регресорів зберігається тільки той, який гарантує максимальне поліпшення поточної моделі, і процедура повторюється.

Для того, щоб зменшити кількість ітерацій, Піродді пропонує оцінювати параметри моделі методом ортогонального найменшого квадрату. Пропонується формулу (3.4) переписати у вигляді:

$$Y = \Phi \vartheta \quad (3.7)$$

де  $Y$  – вектор вихідних даних моделювання,

$\Phi$  – матриця регресорів,

$\vartheta$  – вектор оцінки параметрів моделі.

Далі формула (3.6) приймає вигляд:

$$Y = \Phi(A^{-1}A)\vartheta = (\Phi A^{-1})(A\vartheta) = Wg \quad (3.8)$$

де  $A$  – трикутна матриця по верхній головній діагоналі, яка виводиться з формули  $\Phi^T \Phi = A^T D A$ , де  $D$  – матриця з елементами по головній діагоналі;

$W$  – додаткові регресори;

$g$  – вектор додаткових параметрів.

Знаючи регресори, можна розрахувати додаткові регресори:

$$W = \Phi A^{-1} \quad (10) \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} w_1(1) & w_n(1) \\ w_1(N) & w_n(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1(1) & \varphi_n(1) \\ \varphi_1(N) & \varphi_n(N) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} w_1(1) & w_n(1) \\ w_1(N) & w_n(N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & a_{1n} \\ & & a_{n-1,n} \\ 0 & & 0 \end{bmatrix}$$

Тобто, додаткові регресори можуть бути розраховані наступним чином:

$$\begin{aligned} w_1(t) &= \varphi_1(t), w_2(t) = \varphi_2(t) - a_{12}w_1(t), \dots, w_k(t) = \varphi_k(t) - \sum_{i=1}^{k-1} a_{ik}w_i(t), k \\ &= 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3.10)$$

Трикутна матриця  $A$  розраховується за формулою:

$$A = D^{-1}W^T\Phi \quad (3.11)$$

Кожен її елемент розраховується за формулою:

$$a_{ik} = \frac{\sum_{t=1}^N w_i(t)\varphi_k(t)}{\sum_{t=1}^N w_i(t)^2}, k = 2, \dots, n \quad (3.12)$$

Вектор додаткових параметрів розраховується за формулою:

$$\hat{g}_i = \frac{\sum_{t=1}^N w_i(t)y(t)}{\sum_{t=1}^N w_i(t)^2} \quad (3.13)$$

Тоді вектор оцінки параметрів моделі розраховується за формулою:

$$\begin{aligned} \hat{\vartheta}_n &= \hat{g}_n \\ \hat{\vartheta}_{n-1} &= \hat{g}_{n-1} - a_{n-1,n}\hat{\vartheta}_n \\ &\dots \\ \hat{\vartheta}_i &= \hat{g}_i - \sum_{k=i+1}^n a_{ik}\hat{\vartheta}_k, i = n-1, \dots, 1 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Весь процес оцінки параметрів NARX моделі з n регресорами має вигляд [35]:

$$\begin{aligned} 1. k = 1, a_{11} = 1, w_1(t) = \varphi_1(t), \hat{g}_1 &= \frac{\sum_{t=1}^N w_1(t)y(t)}{\sum_{t=1}^N w_1(t)^2} \\ 2. k = k + 1, a_{ik} &= \frac{\sum_{t=1}^N w_i(t)\varphi_k(t)}{\sum_{t=1}^N w_i(t)^2}, i = 1, \dots, k-1, a_{kk} = 1, w_k(t) \\ &= \varphi_k(t) - \sum_{i=1}^{k-1} a_{ik}w_i(t), \hat{g}_k = \frac{\sum_{t=1}^N w_k(t)y(t)}{\sum_{t=1}^N w_k(t)^2} \\ 3. if k < 2 goto 2, else \hat{\vartheta}_n &= \hat{g}_n, \hat{\vartheta}_i = \hat{g}_i - \sum_{k=i+1}^n a_{ik}\hat{\vartheta}_k, i = n-1, \dots, 1 \end{aligned}$$

### Висновки до розділу 3

1. Зроблено огляд існуючих досліджень ефективності моделей температурного режиму. Для подальших експериментів було обрано NARX модель.
2. Зроблено огляд методів виявлення і видалення аномалій. Для подальшого дослідження уло обрано алгоритм iForest.

3. Було розглянуто метод поліноміальної NARX моделі з оцінкою параметрів методом ортогонального найменшого квадрата Піродді, який був адаптований для використання у моделюванні температурного режиму.

## 4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ У ЗВ'ЯЗАНИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Одним із найважливіших завдань при розробці програмних продуктів є вибір таких засобів, які б полегшили роботу програміста, надавши всі необхідні інструменти для реалізації поставленого завдання, і дали б змогу отримати результат, який повністю задовольняє користувача [28].

В цьому розділі проводиться аналіз обраних програмних систем і компонентів для моделювання температури, та описується структура програмної реалізації для системи моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях.

### 4.1. Вибір засобів реалізації системи моделювання температурного режиму

При створенні програмного забезпечення для моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях було використано:

- середовище розробки Jupyter Notebook;
- дистрибутив мов програмування Anaconda;
- мову програмування Python;
- бібліотеку мови Python Matplotlib;
- бібліотеку мови Python Scikit-learn;
- бібліотеку мови Python PyNeurGen.

Платформою, яка пропонує середовища і інтерпретатори для розробки проєктів і систем було обрано **Anaconda**. Anaconda – це платформа для наукових досліджень, заснована на мові програмування Python. Основна мета цього пакета – надати організаціям можливість успішно захищати, інтерпретувати, масштабувати і зберігати дані, які мають вирішальне значення для повсякденної роботи.

Anaconda – це програмний пакет корпоративного рівня, який надає інноваційні можливості для кінцевого користувача. Кілька основних переваг включають здатність відтворювати дані, масштабованість і кілька рівнів безпеки. Ще одна важлива особливість цього пакета полягає в тому, що він дозволяє організаціям краще управляти і інтерпретувати великі дані; ключовим фактором успіху в сучасному бізнес-середовищі. Він використовує кілька джерел даних, щоб гарантувати надмірність. До них відносяться (але не обмежуються ними) хмарні сховища, SQL, NoSQL і плоскі файли.

Логіку системи, яка реалізує моделювання температурного режиму в приміщеннях, написано мовою **Python** — динамічною, об'єктно-орієнтованою мовою програмування. Вибір зумовлений тим, що мова Python включає в себе бібліотеки та фреймворки різного призначення, використання яких спрощує процес розробки програмних систем.

Технологія мови Python дуже проста та зручна, підтримує модульність. Крім цього, Python має ряд властивостей, притаманних функціональним мовам, — зрозумілий та лаконічний синтаксис, що сприяє ясному відображенню коду. Зручна система функцій дозволяє створювати код, в якому буде легко розібратися іншій людині в разі необхідності [29]. У деяких випадках для написання програми досить лише знайти підходящі модулі і правильно їх скомбінувати. Програма, написана на Python, буде функціонувати абсолютно однаково незалежно від того, в якій операційній системі вона запущена.

Для відображення результату роботи методу, розроблене програмне забезпечення використовує бібліотеку **Matplotlib**, яка спрощує процес створення діаграм та графіків. Matplotlib – бібліотека для побудови 2D графіків масивів в Python. Хоча вона була створена емуляції графічних команд MATLAB®, вона не залежить від MATLAB і може бути використана в об'єктно-орієнтованому вигляді. Хоча Matplotlib написаний переважно на чистому Python, він активно використовує NumPy і інший код розширення для забезпечення гарної продуктивності навіть для великих масивів.

Для запуску і тестування алгоритмів була використана бібліотека **Scikit-learn**. Це інструмент для обробки зображень і імітації штучного інтелекту. Він ґрунтується на бібліотеці SciPy і відповідає за реалізацію алгоритмів машинного навчання. SciKit, як і його математична основа, демонструє високу продуктивність, і має якісну документацію.

Функціональні можливості, які надає **Scikit-learn**, включають в себе:

- наявність неконтрольованих і контрольованих алгоритмів навчання;
- регресія, включаючи лінійну і логістичну регресію;
- класифікація, включаючи K-найближчих сусідів;
- кластеризація, включаючи K-Means і K-Means ++;
- вибір моделі;
- попередня обробка, в тому числі нормалізація Min-Max.

Також була використана бібліотека **PyNeurGen**, яка надає можливості для реалізації NARX нейронної мережі. Це програмне забезпечення надає бібліотеки для використання в програмах Python для побудови гібридів нейронних мереж і генетичних алгоритмів і / або генетичного програмування. Особливість цієї бібліотеки в тому, що вона єдина надає алгоритм для реалізації NARX моделі.

При створенні програмної реалізації поліноміальної моделі NARX мовою програмування Python у середовищі Jupyter Notebook були використані наступні бібліотеки:

- pandas;
- numpy;
- PolynomialFeatures.

**Pandas** — це бібліотека Python, яка надає швидкі та гнучкі структури даних, призначені для того, щоб робота зі структурованими (табличними, багатовимірними, потенційно неоднорідними) і тимчасовими рядами даних була простою і інтуїтивно зрозумілою. Дана бібліотека є фундаментальним структурним елементом високого рівня для проведення практичного аналізу даних взятих з реального світу.

Переваги використання даної бібліотеки:



- автоматичне і чітке вирівнювання даних: об'єкти можуть бути явно вирівняні по набору міток, або користувач може просто ігнорувати мітки і дозволити бібліотеці автоматично вирівнювати дані в обчисленнях;
- потужна і гнучка група по функціональності для виконання операцій комбінування наборів даних для агрегування і перетворення даних;
- дозволяє легко перетворювати нерівні, різноіндексовані дані в інших структурах даних Python в об'єкти для операцій над ними;
- інтуїтивно зрозуміле злиття і об'єднання датасетів;
- велика кількість операцій із датасетами;
- надійні засоби для завантаження і відображення даних з файлів з великою кількістю даних (CSV, Excel файлів, баз даних тощо);
- функціональність, зручна для операцій із часовими рядами: генерація діапазону дат і перетворення дат в потрібний для користувача формат для обчислення (секунди, числа float, int64 тощо).

Багато з цих принципів покликані усунути недоліки, які часто зустрічаються при використанні інших мов, тому для створення програмного забезпечення з моделювання температурного режиму, де використовувалася велика кількість даних, датасети і операції перетворення даних, була обрана бібліотека *pandas*.

Бібліотека **NumPy** — це фундаментальний пакет для наукових обчислень за допомогою Python. За допомогою NumPy можна виконувати математичні і логічні операції з масивами.

Бібліотека містить:

- потужний N-мірний об'єкт масив для перетворення даних у масив і операцій над масивами;
- набір складних математичних операцій над масивами;
- інструменти для інтеграції C / C++ і Fortran код;
- корисні можливості лінійної алгебри, перетворення Фур'є і випадкових чисел;
- крім наукового використання NumPy може також використовуватися в якості ефективного багатовимірного контейнера різних даних. Це

дозволяє NumPy легко і швидко інтегруватися з широким спектром баз даних.

При створенні поліноміальної моделі NARX з оцінкою параметрів методом ортогональних найменших квадратів використовувалося багато математичних обчислень у тому числі багато обчислень із векторами і масивами, тому для швидкості і простоти виконання операцій була обрана саме бібліотека NumPy.

Бібліотека **PolynomialFeatures** дозволяє генерувати поліноміальні і інтерактивні характеристики. Наприклад, дозволяє згенерувати нову матрицю характеристик, що складається з усіх поліноміальних комбінацій характеристик зі ступенем менше або дорівнює зазначеного ступеня. Ця бібліотека необхідна для створення повноцінного функціоналу програмного модулю з моделювання температурного режиму поліноміальною NARX моделлю.

## 4.2. Опис програмної реалізації системи моделювання температурного режиму

Програмний продукт реалізований у модулі «NARX\_Prediction\_Household.ipynb», який реалізує алгоритм моделювання температурного режиму, описаний у попередньому розділі.

Згідно алгоритму, перед початком операції моделювання, потрібно встановити певну кількість характеристик, які відповідають за поточні і минулі значення вхідних і вихідних даних моделі. Після цього ці характеристики потрібно між собою перемножити і нормалізувати для подальшої роботи алгоритму. За нормалізацію характеристик і відповідають методи бібліотеки PolynomialFeatures.

Загальний алгоритм роботи поліноміальної NARX моделі з оцінкою параметрів методом ортогональних найменших квадратів показаний на рисунку 4.1.

Ціль даного алгоритму – створити такі значення параметрів моделі, які при множенні на матрицю характеристик моделі створять масив нових змодельованих значень температури. Ці значення називаються вектор оцінки параметрів моделі і мають позначення  $\vartheta$ .

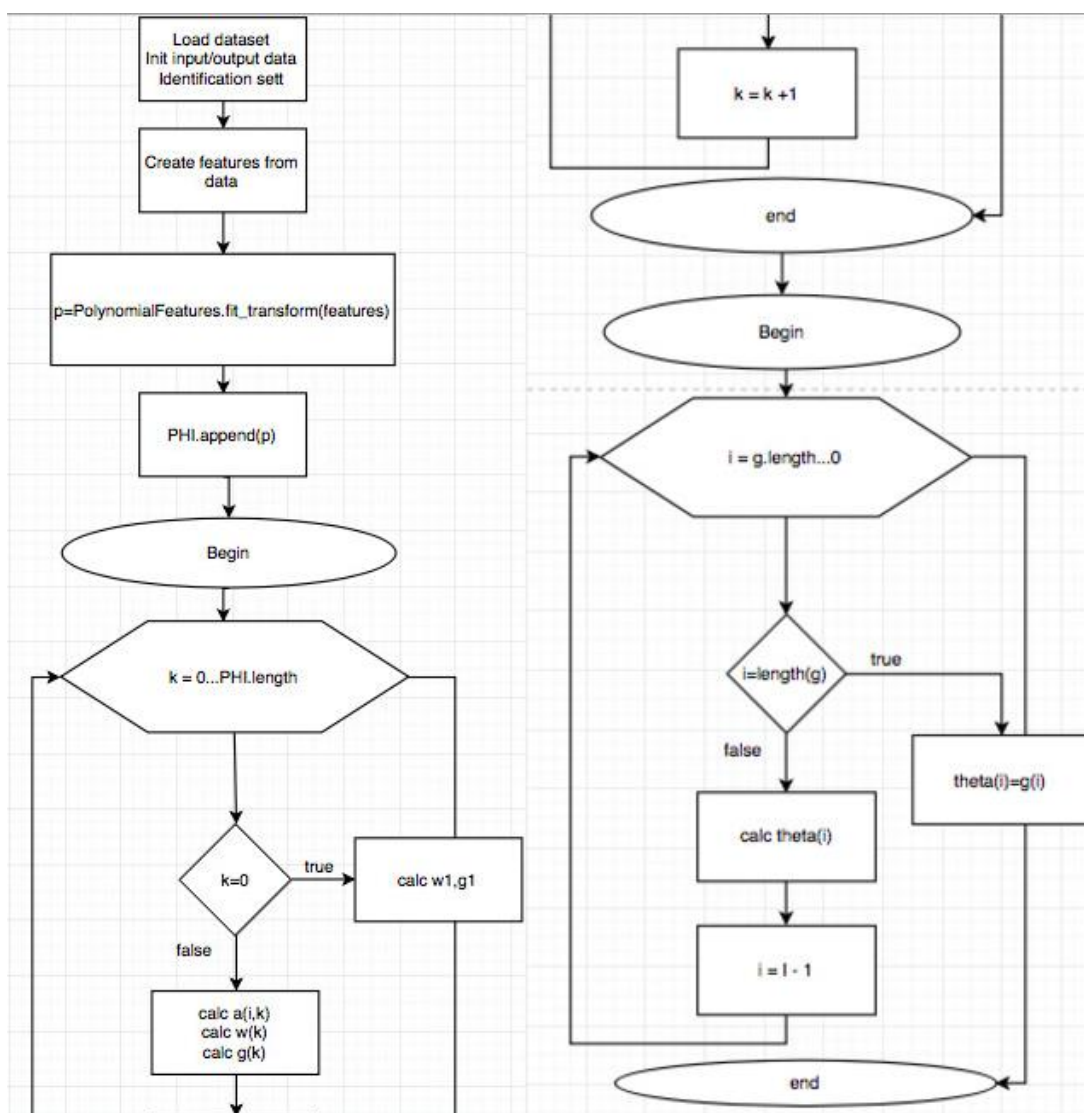


Рисунок 4.1 –Алгоритм роботи поліноміальної NARX моделі

Першим кроком в алгоритмі потрібно обрати датасет із даними температури за допомогою бібліотеки `pandas` методом `read_excel`. Далі користувачу потрібно ініціалізувати вхідні і вихідні дані для моделі. Для цього користувач сам обирає кількість вхідних даних і які дані він хоче змодельовати. Наступний крок — обрати кількість характеристик. Характеристики відповідають за дані на поточному і минулому кроках моделювання. Чим більше характеристик — там більше даних на минулих кроках моделювання бере до уваги модель, моделюючи наступні дані. Емпіричним шляхом встановлено, що оптимальна кількість характеристик для вхідних даних дорівнює дев'яти, а для вихідних даних — чотирьом. Після створення характеристик потрібно їх нормалізувати за допомогою бібліотеки `PolynomialFeatures`

і методу `fit_transform`. Трансформовані характеристики записуються у масив для подальшої обробки.

Для розрахунку вектору оцінки параметрів необхідно розрахувати додаткові регресори, які позначаються як  $w$ , а також вектор додаткових параметрів  $g$ . Подальші матричні операції з векторами і матрицями будуть виконуватися за допомогою бібліотеки NumPy.

Для цього, після трансформації характеристик і запису їх у масив потрібно створити цикл довжиною масиву характеристик для розрахунку додаткових регресорів. На першому кроці перший ряд додаткових регресорів дорівнює першому ряду масиву характеристик.

$$w_1(t) = \varphi_1(t) \quad (4.1)$$

А перше значення додаткових параметрів розраховується за формулою

$$\hat{g}_1 = \frac{\sum_{t=1}^N w_1(t)y(t)}{\sum_{t=1}^N w_1(t)^2} \quad (4.2)$$

В подальшому, при зростанні ітератора, потрібно додатково розрахувати елементи трикутної матриці  $A$   $a_{ik}$ . Це нам допоможе розрахувати додаткові регресори в циклі. Елементи трикутної матриці  $A$  розраховуються за формулою:

$$a_{ik} = \frac{\sum_{t=1}^N w_i(t)\varphi_k(t)}{\sum_{t=1}^N w_i(t)^2} \quad (4.3)$$

Тепер можемо наступним кроком розрахувати додаткові регресори за такою формулою:

$$w_k(t) = \varphi_k(t) - \sum_{i=1}^{k-1} a_{ik} w_i(t) \quad (4.4)$$

Розрахунок додаткових регресорів нам допомагає розрахувати вектор додаткових параметрів моделі  $\hat{g}_k$  для подальшого розрахунку вектору оцінки параметрів моделі. Вектор додаткових параметрів моделі розраховується за наступною формулою:

$$\hat{g}_k = \frac{\sum_{t=1}^N w_k(t)y(t)}{\sum_{t=1}^N w_k(t)^2} \quad (4.5)$$

Після закінчення циклу, маючи значення всіх необхідних складових, розраховується вектор оцінки параметрів моделі за наступною формулою:

$$\hat{\vartheta}_i = \hat{g}_i - \sum_{k=i+1}^n a_{ik} \hat{\vartheta}_k \quad (4.6)$$

Після закінчення циклу і отримання значень вектору оцінки параметрів моделі, щоб отримати нові змодельовані значення температури, потрібно отримані значення вектору  $\vartheta$  помножити на елементи матриці масиву характеристик моделі  $\varphi$ . Таким чином ми отримаємо нові змодельовані значення температури.

Після цього можна вивести змодельовані значення температури у вигляді графіка на екран за допомогою команди `show()`.

## Висновки до розділу 4

У четвертому розділі було виконано наступні дії.

1. Обрано засоби реалізації програмного забезпечення системи моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях.
2. Розроблено алгоритм роботи системи для реалізації поліноміальної моделі NARX з оцінкою параметрів методом ортогонального найменшого квадрату.
3. Розроблено програмний модуль, що реалізує алгоритм поліноміальної моделі NARX з оцінкою параметрів методом ортогонального найменшого квадрату для моделювання температурного режиму.

## **5.МЕТОДИКА РОБОТИ КОРИСТУВАЧА З СИСТЕМОЮ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ У ЗВ'ЯЗАНИХ ПРИМІЩЕННЯХ**

У даному розділі описується методика роботи користувача з системою моделювання температурного режиму у зв'язаних приміщеннях, а саме вимоги до апаратного та програмного забезпечення та інтерфейс користувача. Розроблений програмний продукт призначений для використання інженерами і дослідниками з питань моделювання температурного режиму і оптимізації енерговитрат у приміщенні.

### **5.1. Вимоги до апаратного та програмного забезпечення**

Для коректної роботи програмного продукту персональний комп'ютер має відповідати наступним мінімальним системним та апаратним вимогам:

- операційна система Linux, MacOS, Windows 7, 10 32 або 64-розрядна;
- процесор із тактовою частотою 1 ГГц або швидший – 32-розрядний (x86) або 64-розрядний (x64);
- оперативна пам'ять 1 гігабайт (ГБ) (для 32-розрядної версії) або 2 ГБ (для 64-розрядної версії);
- 256 мегабайт вільного місця на жорсткому диску;
- графічний пристрій із підтримкою DirectX 9 і драйвером WDDM 1.0 або новішим;
- інтернет-браузер (Opera, Chrome, Mozilla, Safari).

### **5.2. Інтеграція програмного модулю для моделювання температурного режиму в Jupyter**

Для зручності користування програмним модулем для моделювання

температурного режиму, оптимальним шляхом буде імпорт даного модуля в середовище розробки Jupyter Notebook.

Першим кроком імпорту програмного модулю є інсталяція дистрибутиву Anaconda для мови програмування Python з відкритим кодом. Це допоможе спростити управління проектом, підключити велику кількість бібліотек, а візуалізація операцій за допомогою Anaconda Navigator надає інтуїтивне розуміння користування дистрибутивом навіть для новачків. Дистрибутив можна безкоштовно завантажити з офіційного сайту Anaconda. Інсталяція проходить у стандартному step-by-step режимі. По замовчуванню, разом з Anaconda встановлюється також Jupyter Notebook, тому не потрібно виконувати додаткових операцій, а одразу запускати дистрибутив.

Після запуску Anaconda інтерфейс дистрибутиву надає вибір із кількох середовищ для розробки, серед яких буде Jupyter Notebook. Наступним кроком є запуск середовища шляхом натискання на кнопку Launch. В результаті запуститься веб-сервер і середовище у вікні браузера. На сторінці користувач побачить своє дерево каталогів у вкладці Files.

Наступним кроком є пошук у дереві каталогів потрібного програмного модулю (рисунок 5.1).

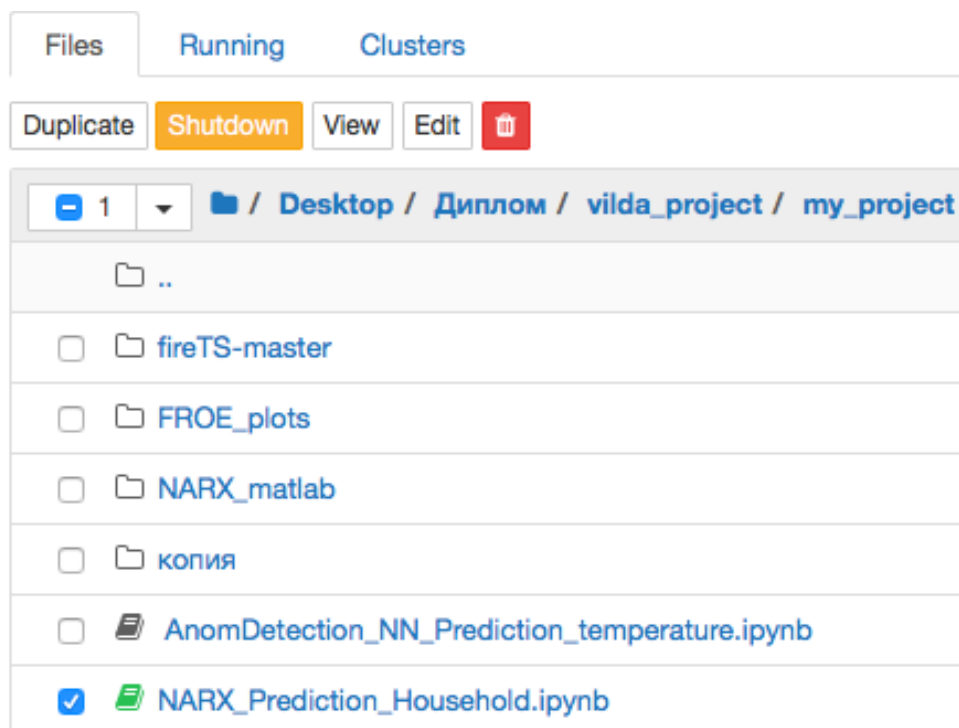
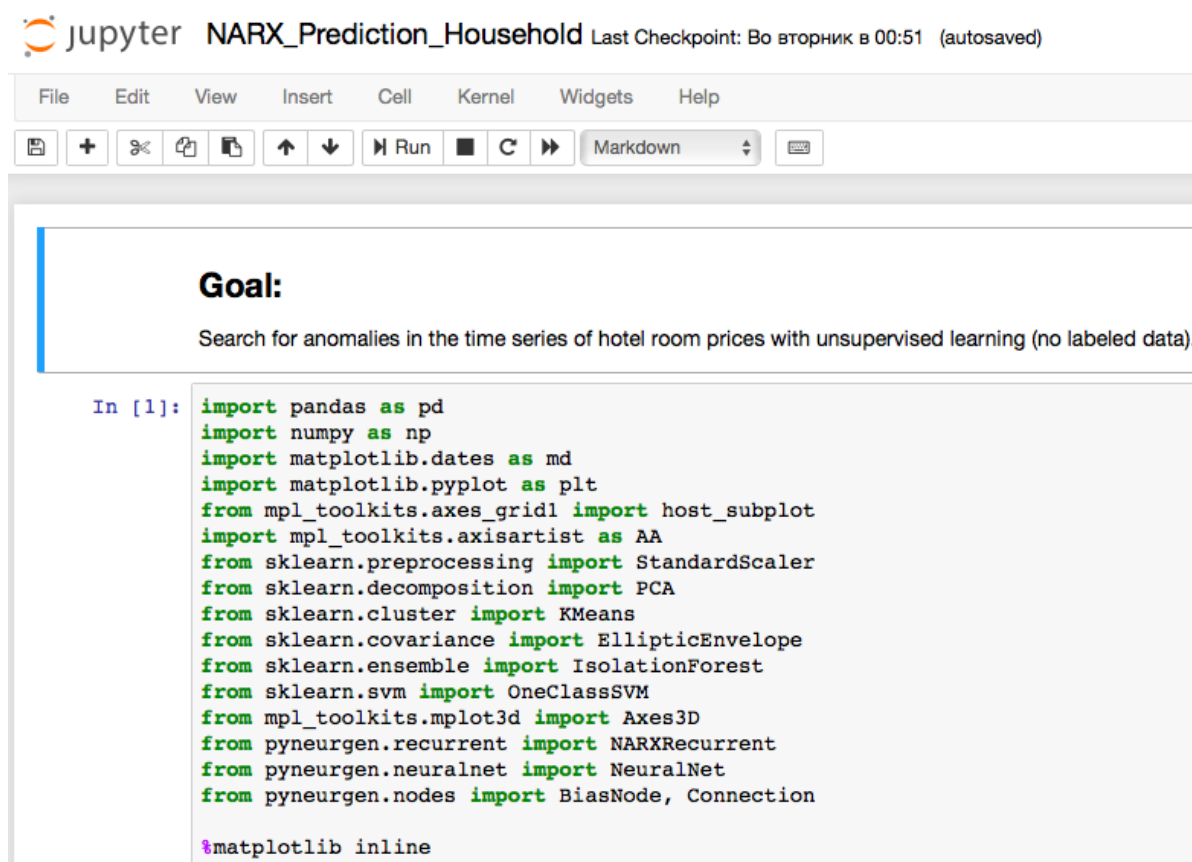


Рисунок 5.1 – Дерево каталогів в середовищі Jupyter Notebook

Тобто користувач у вікні браузера повинен відкрити каталог із збереженим програмним модулем на його комп'ютері. Після знаходження модуля, потрібно відкрити його код для подальших операцій. Це робиться шляхом натискання лівої кнопки миші на обраний програмний модуль.

У новому відкритому вікні браузера користувач побачить код програмного модуля (рисунок 5.2), який вже імпортований у середовище Jupyter і його можна використовувати для запуску, редагувати і бачити результати роботи.



The screenshot shows a Jupyter Notebook window titled "jupyter NARX\_Prediction\_Household". The interface includes a menu bar (File, Edit, View, Insert, Cell, Kernel, Widgets, Help) and a toolbar with icons for saving, adding cells, deleting, copying, pasting, and running code. The main content area displays a code cell with the following Python code:

```
In [1]: import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.dates as md
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.axes_grid1 import host_subplot
import mpl_toolkits.axisartist as AA
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.decomposition import PCA
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.covariance import EllipticEnvelope
from sklearn.ensemble import IsolationForest
from sklearn.svm import OneClassSVM
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from pyneurgen.recurrent import NARXRecurrent
from pyneurgen.neuralnet import NeuralNet
from pyneurgen.nodes import BiasNode, Connection

%matplotlib inline
```

Below the code cell, there is a "Goal:" section with the text: "Search for anomalies in the time series of hotel room prices with unsupervised learning (no labeled data)."

Рисунок 5.2 – Код програмного модуля в середовищі Jupyter Notebook

### 5.3 Приклад використання розробленого програмного модулю для моделювання температурного режиму

Для використання розробленого програмного модулю для моделювання температурного режиму користувач повинен виконати кроки, показані на рисунку 5.3.





Рисунок 5.3 — Алгоритм роботи моделей NARX

Даний алгоритм демонструє етапи роботи системи моделювання температурного режиму у зв'язаних приміщеннях. Як бачимо, тут описані по черзі всі процеси, які повинні виконуватися, щоб отримати результати моделювання.

Згідно визначеного алгоритму необхідно виконати наступні кроки для роботи.

1. Обрати тип моделі NARX: містить весь функціонал для конструювання температурних моделей. Користувач зможе вибрати, яким методом він хоче моделювати температуру.
2. Обрати датасет: користувач обирає датасет для початку роботи програми моделювання.
3. Очистити датасет від аномалій: містить функціонал для знаходження та видалення аномалій в обраному датасеті.
4. Вибрати вхідні і вихідні дані: користувач надає системі дані для початку моделювання і задає, які саме дані треба змоделювати.
5. Почати моделювання: система моделює температуру і користувач отримує графіки результатів моделювання.

### 5.3.1 Використання розробленого програмного модулю для моделювання температурного режиму методом NARX моделі

Якщо користувач використовує програмний модуль для моделювання температурного режиму методом NARX Neural Network, тоді перше, що потрібно зробити у вікні браузера із кодом — це обрати потрібний датасет із даними для моделювання температури. Після того, як через бібліотеку pandas буде викликаний

метод для читання excel файлів, в параметрах цього методу потрібно вказати назву файлу із потрібними даними. Прочитані дані будуть запам'ятовані у змінну (рисунок 5.4).

```
df = pd.read_excel("Forest_tempWithoutAnomalies3.xlsx")
```

Рисунок 5.4 – Вибір і запам'ятовування файлу із даними для моделювання температурного режиму

Наступним кроком — користувачу потрібно обрати вхідні дані моделі і вихідні дані, тобто ті, які потрібно змодельовати. Операція вибору вхідних даних виконується шляхом вказання змінній, в якій завантажений excel файл із даними, назви колонок із потрібними даними на вхід до моделі (рисунок 5.5).

```
inpt = df[["Temps", "T1_2", "T1_1", "Temperature exterieure"]]
```

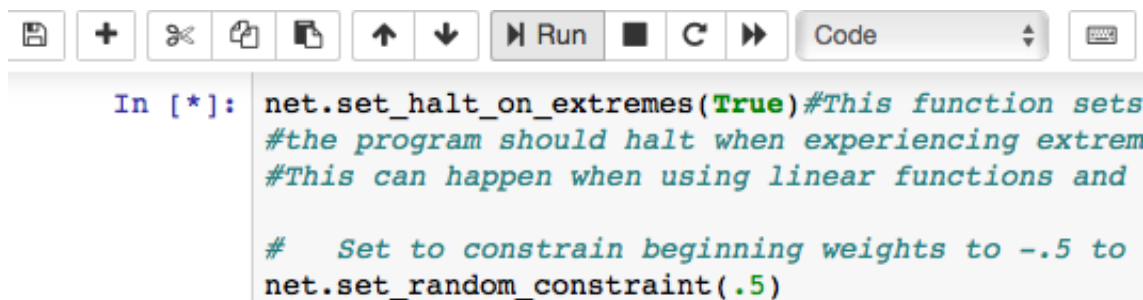
Рисунок 5.5 – Вибір вхідних даних для моделювання температурного режиму

Операція вибору вихідних даних виконується шляхом вказання змінній, в якій завантажений excel файл із даними, назви колонок із потрібними даними для моделювання температури (рисунок 5.6).

```
output = df[["T1_1"]]
```

Рисунок 5.6 – Вибір вихідних даних для моделювання температурного режиму

Після виконання цих операцій, користувач може запустити систему на виконання, натиснувши кнопку запуску Run у верхній стрічці меню проекту середовища Jupyter Notebook (рисунок 5.7). Біля вікна коду з'явиться зірочка, що означатиме, що код виконується, потрібно почекати.



The screenshot shows a Jupyter Notebook toolbar with icons for saving, adding, deleting, and running code. Below the toolbar, a code cell is displayed with the following Python code:

```
In [*]: net.set_halt_on_extremes(True) #This function sets
#the program should halt when experiencing extrem
#This can happen when using linear functions and

# Set to constrain beginning weights to -.5 to
net.set_random_constraint(.5)
```

Рисунок 5.7 – Виконання коду системи моделювання

### 5.3.2 Використання розробленого програмного модулю для моделювання температурного режиму методом поліноміальної NARX моделі.

Якщо користувач використовує програмний модуль моделювання температурного режиму методом поліноміальної NARX моделі, то для завантаження датасету і вибору вхідних і вихідних даних потрібно виконати операції, описані в попередньому пункті.

Далі потрібно створити змінні, кожна з яких відповідає вхідному і вихідному значенню для моделювання. Кожній змінній присвоїти значення вхідних і вихідних даних шляхом вказання номеру їх стовпця у датасеті (рисунок 5.8).

```
time = [float(x[1]) for x in lst]
u = [float(x[20]) for x in lst]
i = [float(x[3]) for x in lst]
y = [float(x[2]) for x in lst]
```

Рисунок 5.8 – Змінні вхідних і вихідних даних

Після того, як у змінні збереглися вхідні і вихідні дані, їх потрібно розділити на тренувальний та тестовий датасет. Це робиться шляхом вказання довжини тренувального датасету і запису циклом від першого елемента до довжини тренувального датасету у нові змінні. Така ж операція виконується для тестового датасету, тільки цикл починається після останнього значення тренувального датасету і до останнього значення даних (рисунок 5.9).

```

ID LENGHT = int(len_ * .8)
time_id = time[:ID LENGHT]
u_id = u[:ID LENGHT]
i_id = i[:ID LENGHT]
y_id = y[:ID LENGHT]

time_val = time[ID LENGHT:]
u_val = u[ID LENGHT:]
i_val = i[ID LENGHT:]
y_val = y[ID LENGHT:]

```

Рисунок 5.9 – Поділ даних на тренувальний і тестовий сет

Останнім кроком є вказання моделі кількості характеристик(регресорів) із тренувального сету для створення поліному. Ця операція робиться шляхом додавання у масив `regressors` змінних вхідних і вихідних даних тренувального датасету. Кількість характеристик для вхідних даних задається за допомогою змінної `Input_delay`, для вихідних даних — за допомогою змінної `Output_delay` (рисунок 5.10).

```

Input_delay = 10;
Output_delay = 4;
for i in range(ID LENGHT - Input_delay):
    regressors = [u_id[i:i+Input_delay] +
                  i_id[i:i+Input_delay] +
                  y_id[i:i+Output_delay]

```

Рисунок 5.10 – Вказання кількості регресорів для вхідних і вихідних даних

Після виконання цих операцій, користувач може запустити систему на виконання, натиснувши кнопку запуску `Run` у верхній стрічці меню проекту середовища Jupyter Notebook. Біля вікна коду з'явиться зірочка, що означатиме, що код виконується, потрібно почекати.

## Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі було:

1. Визначено вимоги до апаратного та програмного забезпечення системи моделювання температурного режиму.

2. Розглянуто покрокову інструкцію інтеграції програмного модулю для моделювання температурного режиму в середовище Jupyter.
3. Розглянуто методику використання розробленого програмного модулю для моделювання температурного режиму методом NARX Neural Network моделі та методом поліноміальної NARX моделі.

## 6. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ

В цьому розділі описаний експеримент і результати моделювання температурного режиму двома методами, розглянутими у попередньому розділі.

### 6.1 Опис експерименту з моделювання температури

У цій частині описується процес експерименту збору температурних даних досліджуваного приміщення і методологія моделювання температури в приміщенні. Наступна схема на рисунку 6.1 демонструє процес експерименту.

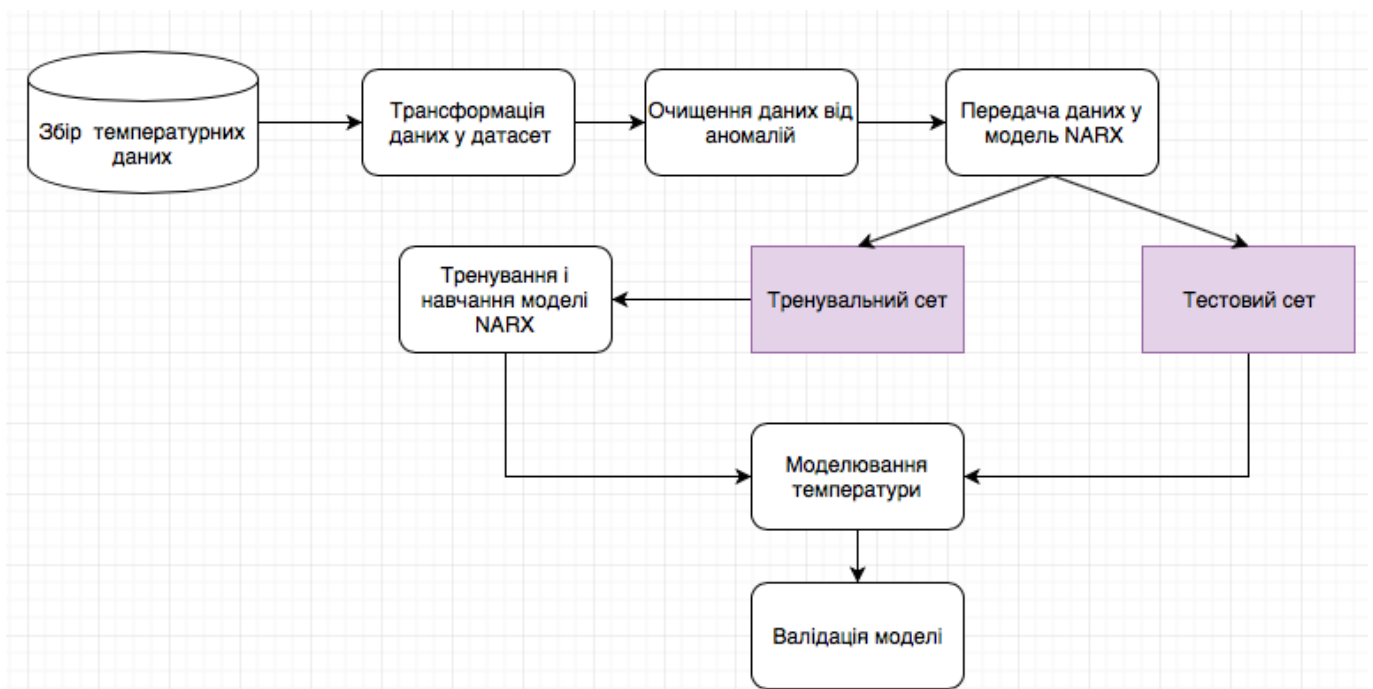


Рисунок 6.1 – Процес експерименту

Для отримання глибоких знань про теплові характеристики будівлі необхідно збирати дані часових рядів, що впливають на внутрішню температуру в будинку. Згідно з дослідженнями, період збору даних може охоплювати період від двох місяців [5] до одного місяця або навіть трьох днів. Дані температури можуть бути зібрані з

вибіркою у 5 або 15 хвилин.

Для експерименту було обрано будівлю житлового комплексу Association pour l'Hébergement des Etudiants et Enseignants de Nancy : APHEEN, корпус А, місто Нансі, Франція (рисунок 6.2).



Рисунок 6.2 – Комплекс APHEEN, корпус А

Ціль експерименту була встановити датчики виміру температури в обраному приміщенні (зоні дослідження) будівлі і отримати показники температури та тиску протягом встановленого часу для подальших експериментів з моделювання. Обране приміщення – технічне приміщення житлового комплексу на першому поверсі. Приміщення має два маленьких вікна розміром 70x20 см. Під час досліджень з виміром температури і тиску, в приміщення не заходило жодної людини.

Зона дослідження складається із двох кімнат, які розділені між собою аркою. Загальна площа досліджуваного приміщення – 90 квадратних метрів (рисунок 6.3).





Рисунок 6.3 – Перша кімната зони дослідження

На рисунку 6.4 можемо бачити другу кімнату досліджуваного приміщення.



Рисунок 6.4 – Друга кімната зони дослідження



Встановлені сенсори вимірювали температуру протягом чотирьох днів з першого жовтня 2018 року від 00:00 до п'ятого жовтня 2018 року 00:00. Кількість встановлених сенсорів дорівнювала 18. Дев'ять сенсорів встановлено на стінах всередині приміщення мають позначення від T1\_1 до T9\_1. Приклад із сенсором під номером T7\_1 у приміщенні можемо бачити на рисунку 6.5.



Рисунок 6.5 – Сенсори всередині приміщення

Інші дев'ять сенсорів встановлені на зовнішній стороні стін приміщення для вимірювання температури стін ззовні. Сенсори ззовні мають позначення від T1\_2 до T9\_2. Приклад сенсорів можемо бачити на рисунку 6.6.

Показники температури вимірювались кожні дві хвилини і зберігались у вигляді секунд.

Зібрані дані після закінчення вимірів експортувалися у два файли формату \*.xlsx. У першому файлі зібрані дані:

- час у секундах;
- T1\_1, T2\_1, T3\_1, T4\_1, T5\_1, T6\_1, T7\_1, T8\_1, T9\_1 – виміри сенсорів в приміщенні в градусах Цельсія;

- $T1\_2$ ,  $T2\_2$ ,  $T3\_2$ ,  $T4\_2$ ,  $T5\_2$ ,  $T6\_2$ ,  $T7\_2$ ,  $T8\_2$ ,  $T9\_2$  – виміри сенсорів ззовні приміщення в градусах Цельсія.

У другому файлі зібрані наступні дані.

- ті ж показники часу у секундах;
- швидкість вітру;
- тиск;
- показники температури на вулиці в градусах Цельсія.



Рисунок 6.6 – Сенсори ззовні приміщення

## **6.2 Моделювання температури зони дослідження NARX моделлю**

Набір даних був розділений на 80% даних для навчання і 20% даних для тестування. Перш ніж відправляти дані в модель, потрібно підігнати і перетворити дані тренувань. Було розраховано середнє значення і відхилення від значень в даних

для тренування. Після того потрібно було перетворити всі ознаки, віднімаючи середнє значення і розподіл на дисперсію. Причина, по якій потрібно встановити скаляр, використовуючи тільки дані тренування, полягає в тому, що модель не повинна бути спортворена за допомогою інформації з тестових даних.

Після цього було трансформовано тестові дані, використовуючи параметри, обчислені на тренувальних даних. Модель пройшла навчання на 80% зібраних даних. Після запуску процесу подачі вперед фактичні значення, розраховані на виході, приводяться у відповідність із заданими значеннями. Ці помилки потім використовуються в процесі зворотного поширення для налаштування ваг для наступного набору входів.

Для дослідження було вирішено змодельовати температуру стіни у середині приміщення, показники якої відповідають сенсору T1\_1. В якості вхідних параметрів в модель були використані наступні значення з набору даних:

- Temp – час вимірювання температури;
- T1\_2 – датчик поруч з датчиком T1\_1;
- Temperature exterieure – температура на вулиці.

На рисунку 6.7 представлено порівняння даних випробувань з сенсора T1\_1 з температурою, змодельованою за допомогою моделі NARX. Графік реальної температури в датасеті позначений синім кольором, графік змодульованої – червоним.

Для валідації моделі було використано формулу 3.1, де  $n$  – кількість даних в тестовому наборі;  $Y$  – температура сенсора T1\_1 в тестовому наборі даних;  $\hat{Y}$  – змодульована температура T1\_2.

Значення MSE (середньої квадратичної похибки між реальною та змодельованою температурою) для нашого випадку з рисунку 6.7 дорівнює 0,037969104391744196.

Моделювання температури для сенсора T2\_1 при вхідних даних часу, температури на вулиці і значень сенсора T2\_2 має результати, показані на рисунку 6.8.

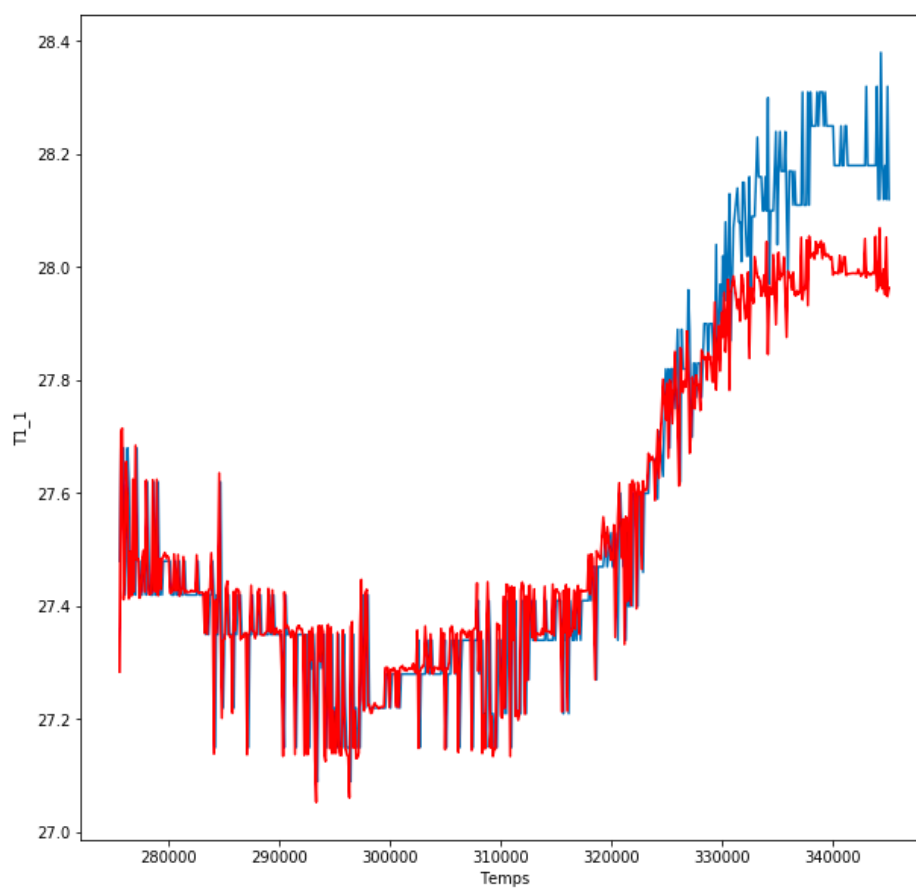


Рисунок 6.7 – Показники реальної та змодульованої температури T1\_1

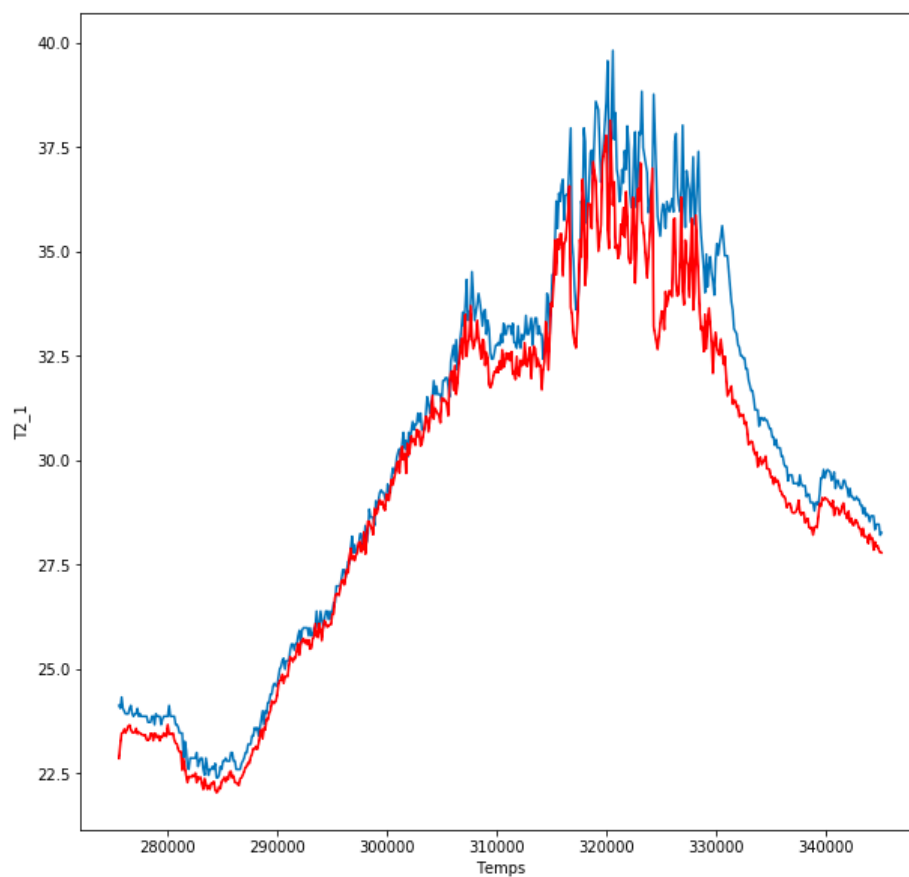


Рисунок 6.8 – Показники реальної та змодульованої температури T2\_1

Значення MSE для цього випадку має значення 0,017023879295774334.

Із зазначених вище результатів моделювання можна зробити висновок, що модель NARX дає задовільні результати, але не завжди точно відстежує динаміку температури приміщення. Отже, не зважаючи на те, що дослідження, результати яких зазначено вище, визначають модель NARX, як оптимальну модель для моделювання температури, дана модель має певні неточності в моделюванні.

### 6.3 Моделювання температури зони дослідження поліноміальною NARX моделлю

Моделювання проводилося на тих же даних, що і моделювання NARX моделлю. Результати моделювання температури сенсора T1\_1 можемо бачити на рисунку 6.9.

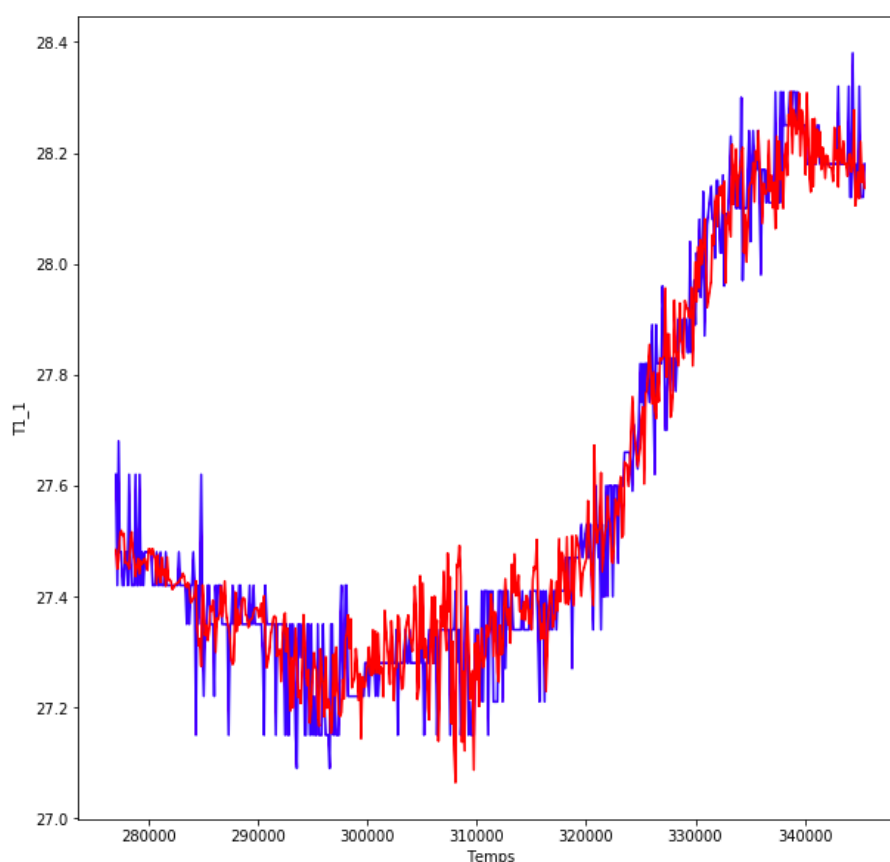


Рисунок 6.9 – Показники реальної та змодельованої температури T1\_1

Синім кольором позначена реальна температура тестового набору даних, червоним кольором позначена змодельована температура.

Значення MSE для цього випадку має значення 0,037795147189582474

Результати моделювання температури сенсора T2\_1 можемо бачити на рисунку 6.10.

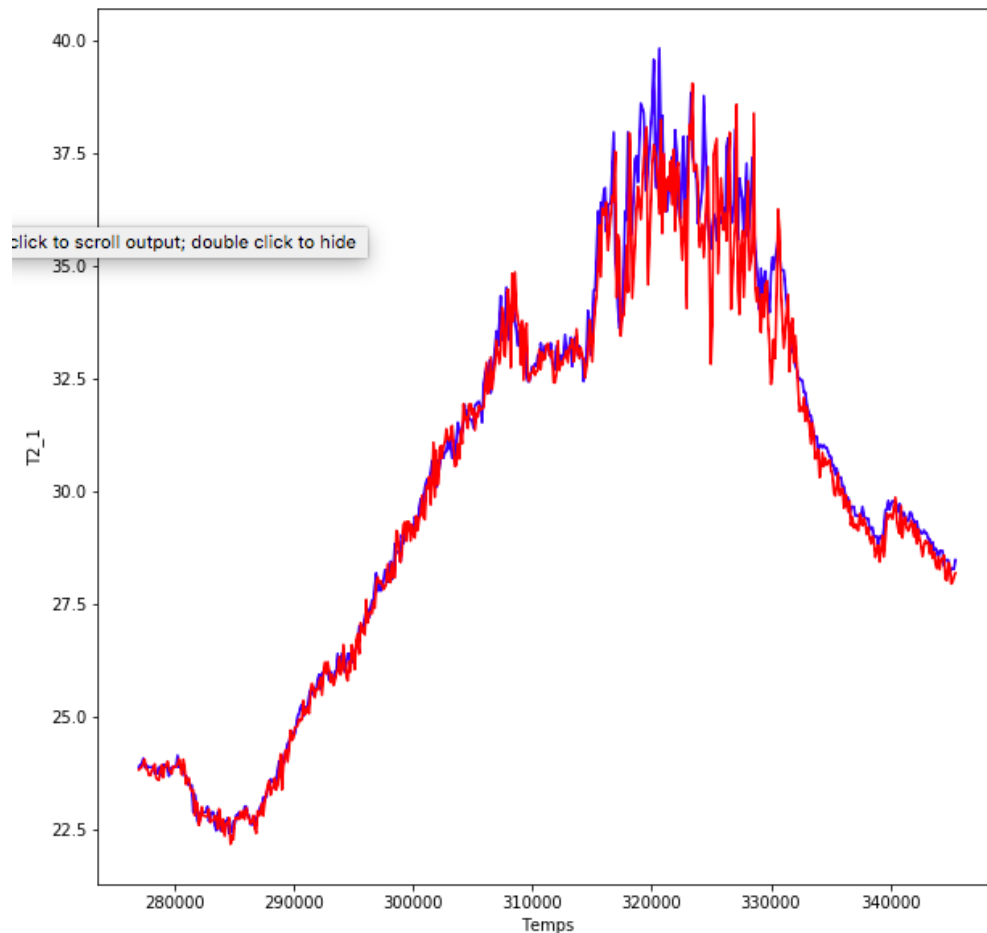


Рисунок 6.10 – Показники реальної та змодельованої температури T2\_1

Значення MSE для цього випадку має значення 0,13343408485505215

Таблиця 6.1 надає порівняння точності роботи двох моделей NARX.

Таблиця 6.1. Порівняння точності роботи двох моделей NARX

Температура сенсора	Точність NARX моделі	Точність поліноміальної NARX моделі
T1_1	0,037969104391744196	0,037795147189582474
T2_1	0,017023879295774334	0,13343408485505215

З графіків на рисунках 6.7 – 6.10 та таблиці 6.1 можна зробити висновок, що спосіб моделювання температурного режиму зв'язаних приміщень шляхом використання методу поліноміальної NARX моделі з оцінкою параметрів методом ортогонального найменшого квадрату дозволяє зменшити похибку моделювання на пікових інтервалах на 46% в порівнянні з використанням NARX моделі для даних поточного експерименту. В той же час на часових інтервалах, де температура в приміщеннях змінюється плавно, обидві моделі мають приблизно похибку 4%.

## **Висновки до розділу 6**

У шостому розділі було:

1. Проведено опис експерименту з моделювання температури, який відбувся в приміщенні житлового комплексу.
2. Розглянуто результати моделювання температури зони дослідження NARX моделлю.
3. Розглянуто результати моделювання температури зони дослідження поліноміальною NARX моделлю.
4. Наведено порівняльну таблицю точності роботи двох моделей NARX. Зроблено висновок, що поліноміальна модель краще відстежує динаміку зміни температурного режиму в приміщенні.

## ВИСНОВКИ

В ході даної магістерської роботи було проведено дослідження сучасних методів моделювання температурного режиму і сучасних систем оптимізації енерговитрат за результатами моделювання.

В ході досліджень було виявлено, що оптимальним варіантом є використання моделі чорного ящика, яка має перевагу повторного застосування для будівель з іншими архітектурними та фізичними параметрами.

В ході подальших досліджень було виявлено, що оптимальна модель для моделювання температури – NARX модель. В ході проведення експерименту по збору даних температури приміщень була проведена симуляція роботи моделі. Результати показали, що модель дає прийнятні результати, але має деякі недоліки, а саме: неточність при моделюванні температури в деяких випадках і незадовільне відстеження динаміки температури.

Було запропоновано використовувати інший метод моделювання температури – поліноміальну модель NARX Паруджі, яка була адаптована для застосування при моделюванні температурного режиму приміщень.

Результати порівняння роботи двох моделей показали, що запропонована поліноміальна модель NARX моделює температуру на 46 % точніше, отже її можна використовувати в подальших дослідженнях.

Для проведення моделювання було спроектовано та реалізовано програмний модуль для реалізації моделі NARX та поліноміальної моделі NARX. Описано загальну методику інтеграції розробленого програмного модуля в інтегроване середовище розробки Jupyter та роботи користувача з програмним модулем, що забезпечує швидку адаптацію користувача до особливостей роботи з системою.

Розроблений програмний продукт виконано відповідно до заданих вимог, з використанням сучасних підходів до розробки програмних застосунків.



Користувачами системи можуть бути інженери і дослідники, які працюють в сфері оптимізації енергоспоживання та енергоефективності приміщень, та науковці, чий дослідження пов'язані з моделювання температури і оптимізацією енергоспоживання.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення методів оптимізації параметрів теплової моделі.

Система введена та використовується на підприємстві ТОВ «ИТ-ТРАНЗИТ».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Eurostat statistics [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy\\_consumption\\_in\\_households#Energy\\_consumption\\_in\\_households\\_by\\_type\\_of\\_end-use](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households#Energy_consumption_in_households_by_type_of_end-use).
2. Global CO2 emissions [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: [https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/18/files/Norway\\_CICERO\\_GCPBudget2018.pdf](https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/18/files/Norway_CICERO_GCPBudget2018.pdf).
3. Énergie dans les bâtiments [Електронний ресурс] // Ministere de la Transition écologique. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/energie-dans-batiments>.
4. M. Raisul Alam, A review of smart homes – Past, Present and Future / M. Raisul Alam, M. Bin Ibne Reaz. – 2012. – P.1–15.
5. Thavlov, A. and H.Bindner, Thermal Models for Intelligent Heating of Buildings, In Proceedings of the International Conference on Applied Energy, ICAE 2012, 1-10p.
6. Pouresmail E. Development of a smart residential load simulator for energy management in smart grids / E. Pouresmail, J.Gonzales, K.Bhattachaya // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – № 6 – P.1443– 1452
7. Sullivan R. A procedure for modelling buildings and their thermal zones using co-simulation / R. Sullivan, S. Thil // Energy and buildings. – 2014. – Vol.78 – P.231– 237.
8. Sullivan R. Black-box modeling of buildings thermal behavior / R. Sullivan, S. Thil // Energy and buildings. – 2014. – Vol.78 – P.256– 264.
9. BuildingIQ Develops Proactive Algorithms for HVAC Energy Optimization in Large-Scale Buildings [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: [https://www.mathworks.com/company/user\\_stories/buildingiq-](https://www.mathworks.com/company/user_stories/buildingiq-)

- develops-proactive-algorithms-for-hvac-energy-optimization-in-large-scale-buildings.html.
10. Gustin M. Prediction of internal temperatures during hot summer conditions with time series forecasting models / M. Gustin, R. McLeod, K. Lomas // Building Simulation and Optimization 2018. – 2018. – P.413– 425.
  11. Yanf Z. An efficient approach to parameter identification in a building thermal model / Z. Yang, X. Li, P. Bowers, K. Tang // IEEE Transactions on systems, MAN, and Cybernetics. – 2012. – № 6 – P.957– 969.
  12. Edwards R. Predicting future hourly residential electrical consumption / R. Edwards, J. Ryan New, L. Parker// Energy and buildings. – 2012. – Vol.49 – P.591– 603.
  13. Ryder-Cook D. Thermal modelling of buildings / D. Ryder-Cook // Building Performance Modeling. – 2009. – №12 – P.114– 126.
  14. Gonzalez-Vidal A. Data driven modeling for energy consumption prediction in smart buildings / A. Gonzalez-Vidal, F. Terroso-Saenz, A. Skarmeta // IEEE Transactions on systems, MAN, and Cybernetics. – 2017. – P.15– 22.
  15. Homod R. Review on the HVAC System modeling types and the Shortcomings of their application / R. Homod // Journal of Energy. – 2013. – 10p.
  16. Madsen H. Thermal performance characterization using time series data / H. Madsen, P. Bacher, G. Bauwens, G. Reynders // Technical University of Denmark. – 2015. – №8 – 84p.
  17. Drury B. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program / B. Drury, L. Lawrie, F. Winkelmann, O. Pedersen // Energy and Buildings. – 2001. – Vol.33 – P.319– 331.
  18. Shamsul F. Black box modelling the thermal behavior of iHouse using Auto Regressive and Moving Average (Arma) model / F. Shamsul, N. Hoaison, S. S. Abdullah, Y. Tan // Jurnal Teknologi. – 2016. – №78 – P.51–58.
  19. Li X. Review of building energy modeling for control and operation / X. Li, W. Jin // Renewable and Sustainable energy reviews. – 2014. – Vol.37 – P.517– 537.

20. Shengwei W. Quantative energy performance assesments methotds for existing buildings / W. Shengwei, Y. Chengchu, X. Fu // Energy and Buildings. – 2012. – Vol.55 – P.873–888.
21. TRNSYS [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.trnsys.com>.
22. Deque F. Grey boxes used to represent buildings with a minimum number of geometric and thermal parameters / F. Deque, F. Olivier, A. Poblador // Energy and Buildings. – 2000. – Vol.31 – P.29-35.
23. Burnand G. The study of the thermal behavior of structures by electrical analogy / G. Burnard // British Journal of Applied Physics. – 1952. – Vol. 3 – 50p.
24. BuildingIQ [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <https://buildingiq.com/resources/faqs/>.
25. Neuman C. Modellbasierte Methoden für die Fehlererkennung und Optimierung im Gebäudebetrieb / C. Neuman, D. Jacob, A. Florita, E. Burger, F. Shmidt // Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek. – 2011. – Vol.3 – 285p.
26. Joseph A. Advantage of black-box modeling of mixed-signal integrated circuits / A. Joseph, M. Jyolsna // International journal of Scientific Development and Rresearch. – 2016. – Vol.1 – P.541–564.
27. Hamzacebi C. Forecasting the annual electricity consumption of Turkey using a grey model / C. Hamzacebi // Energy: the international journal. – 2014. – Vol.70 – P.165-171.
28. Arendt K. Comparative analysis of white-,gray- and black-box models for thermal simulation of indoor environment / K. Arendt, M.Jradi, H. Shaker, C. Veje // Building Performance modeling journal. – 2018. – Vol.64 – P.173–180.
29. BuildingIQ's Artificial Intelligence [Электронный ресурс] // Planet Experts. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.planetexperts.com/buildingiqs-artificial-intelligence-delivers-next-generation-energy-efficiency>.

30. Gonzaga L. An application of non-linear autoregressive neural networks to predict energy consumption in buildings / L. Gonzaga, M. Cuellar, M. Delgado, M. del Carmen // *Energies*. – 2016. – Vol.9 – P.684–695.
31. Lee W. NARX modeling for real-time optimization of air nd gas compression systems n chemical processes / W. Lee, K. Kyeongsu, L. Jong, L. Younggeun// *Computers & Chemical Engineering*. – 2018. – Vol.115 – P.262–274.
32. Pisoni E. Forecasting peak air pollutionlevels using NARX models / E. Pisoni, M. Farina, L. Piroddi // *Engineering application of artificial intelligence*. – 2009. – Vol.22 – P.593–602.
33. Domingues R. A comparative evaluation of outlier detection algotithms: Experiments and analyses / R. Domingues, M. Fillippone // *Pattern recognition*. – 2018. – Vol.19 – P.33-46.
34. Liu F. Isolation-Based Anomaly detection / F. Liu, K. Ming Ting, Z. Zhi // *Transactions on knowledge discovery*. – 2012. – Vol.6 – P.1–39.
35. Piroddi L. Nonlinear identification: a neural network approach / L. Piroddi // *Journal of the Franclin institute*. – 2015. – Vol.33B – P.135–153.

# ДОДАТОК А

Апробації

УКР.НТУУ “КПІ”.ТР32269\_19М

Аркушів 7

2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ  
СІКОРСЬКОГО»

# СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ

Матеріали XVI Міжнародної  
науково-практичної конференції  
аспірантів, магістрантів і студентів  
м. Київ, 24-27 квітня 2018 року,

ТОМ 2



Київ- 2018

### **МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В ЗВ'ЯЗАНИХ ПРИМІЩЕННЯХ**

Розумні будинки або приміщення комерційного призначення дозволяють, в тому числі, підтримувати оптимальну температуру в кімнатах та мінімізувати витрати на опалення або охолодження приміщень завдяки коригуванню з централізованого пульта-дисплею налаштувань обігрівачів або кондиціонерів на основі реальних або очікуваних температур [1]. Комфортний клімат в будинку в холодну та теплу пори року забезпечує ціла група приладів: котли, радіатори, кондиціонери, системи підігріву підлоги і нагріву води. Ручне управління всіма цими елементами досить клопітно. Необхідно щоразу налаштовувати їх роботу відповідно до погодних умов, бажань мешканців, часу доби тощо. Для того, щоб вручну не виконувати дані налаштування, використовуються відповідні програмні комплекси. Однак, при проектуванні відповідних рішень замовники часто бажають отримати інформацію про те, наскільки подібні системи дозволять економити енергетичні та монетарні ресурси до того, як проект переходить на етап експлуатації. Тому актуальною є задача моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях з урахуванням взаємодії з навколишнім середовищем, приладами, що знаходяться в приміщеннях та виділяють тепло, людьми тощо.

Для вирішення цієї задачі пропонується використовувати програмний комплекс для моделювання та симуляції складних систем MECSYCO (Multi-agent Environment for Complex SYstem CO-simulation), який використовує мульти-агентну архітектуру для інтеграції різних компонентів в симуляцію [2]. Даний комплекс дозволяє підключати до нього і передавати інформацію між різними симуляторами, які генерують як дискретні так і аналогові значення. Основною метою даної системи є зчитування або генерація даних про температуру об'єктів, які знаходяться в модельованих приміщеннях, температуру навколишнього середовища та передача отриманих даних по відповідному протоколу в MECSYCO. В результаті роботи системи планується отримати симуляцію розподілу температури у зв'язаних приміщеннях в реальному часі.

Для реалізації даної системи було вирішено використовувати кросплатформену мову програмування Java [3], кількість і зручність бібліотек якої дозволить виконати всі розрахунки і реалізувати алгоритм передбачення часу встановлення необхідної температури. Для реалізації інтерфейсу користувача системи було вирішено використовувати графічні компоненти Swing [4].

Завдяки даному програмному забезпеченню користувач зможе моделювати температурний режим у зв'язаних приміщеннях з урахуванням взаємодії з навколишнім середовищем, приладами, що знаходяться в приміщеннях та виділяють тепло, людьми тощо.

#### **Перелік посилань:**

1. Розумний будинок – управління кліматом [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: [http://www.smarthouse.ua/ua/upravlenie\\_klimatom.html](http://www.smarthouse.ua/ua/upravlenie_klimatom.html).
2. MECSYCO [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://mecsyc.com/>.
3. Монахов В.В. Язык программирования Java и среда NetBeans : учебник / В.В. Монахов. - СПб.: БХВ-Петербург, 2011. - 704 с.
4. Шилдт Г. Swing руководство для начинающих : учебник / Г. Шилдт. - М.: ИД Вильямс, 2007. - 704 с.



<b>перетвореннях.</b>	76
<i>РОМАНОВА Д.П., магістрант гр. ТМ-61м</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Сидоренко Ю.В.</i>	
<b>Автоматична побудова єдиної семантичної мережі знань з великої кількості текстів природної мови.</b>	77
<i>САВЧЕНКО М.М., магістрант гр. ТІ-61м</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Крячок О.С.</i>	
<b>Засоби оптимізації роботи виїзних груп станцій переливання крові.</b>	78
<i>СЕМЕНЧУК І.О., магістрант гр. ТР-61м</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Кублій Л.І.</i>	
<b>Застосування QGIS в умовах модернізації аеропорту.</b>	79
<i>СІДЬКО О.С., спеціаліст гр. ТІ-61м</i>	
<i>Керівник - доц., к.е.н. Левченко Л.О.</i>	
<b>Використання нейронних мереж для задач семантичної сегментації.</b>	80
<i>БАЙДА Д.В., магістрант гр. ТР-71м</i>	
<i>Керівник - ст. викл., к.т.н. Шалденко О.В.</i>	
<b>Моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях.</b>	81
<i>ВІЛЬДА Д.О., магістрант гр. ТР-71м</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Михайлова І.Ю.</i>	
<b>Використання протоколу MQTT для створення сервісу обміну повідомленнями.</b>	82
<i>ГУМЕНЮК Л.М., магістрант гр. ТВ-71м</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Сидоренко Ю.В.</i>	
<b>Семантичний транслятор людської мови у командний набір управління програмним забезпеченням.</b>	83
<i>ЗАВЕРТАНА І.Я., магістрант гр. ТВ-71м</i>	
<i>Керівник - ст. викл., к.т.н. Шалденко О.В.</i>	
<b>Система діагностування стану турбіни.</b>	84
<i>ЛИСЕНКО Д.В., магістрант гр. ТІ-71м</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Адамовський Б.І.</i>	
<b>Система реконструкції маски обличчя на основі фотозображень.</b>	85
<i>ЛОГВІН М.А., магістрант гр. ТВ-71м</i>	
<i>Керівник - ст. викл., к.т.н. Шалденко О.В.</i>	
<b>Програмне забезпечення для зберігання та обробки неструктурованих документів.</b>	86
<i>МАСЕЧКО І.О., магістрант гр. ТР-71м</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Михайлова І.Ю.</i>	
<b>Засоби моделювання енергетичних потоків будівлі.</b>	87
<i>НОВОСЯДЛИЙ Д.В., магістрант гр. ТМ-71м</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Кублій Л.І.</i>	
<b>Розпізнавання шаблонів з використанням нейронних мереж.</b>	88
<i>ОПЕЙДА Р.А., магістрант гр. ТР-71м</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Аушева Н.М.</i>	
<b>Програмне забезпечення для взаємодії PDM та CAD систем.</b>	89
<i>ОРЕЛ Д.С., магістрант гр. ТВ-71м</i>	
<i>Керівник - асист. Колумбет В.П.</i>	
<b>Моделювання переносу забруднювачів в річках України з використанням програми моделювання QUAL2K та геоінформаційної системи ArcGis.</b>	90
<i>ПАТЕНКО Р.М., магістрант гр. ТВ-71м</i>	
<i>Керівник - асист. Швайко В.Г.</i>	
<b>Захист середи хмарних обчислень шляхом верифікації програмного</b>	

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ

Матеріали XVII Міжнародної  
науково-практичної конференції  
молодих вчених та студентів  
м. Київ, 23-26 квітня 2019 року,

ТОМ 2



Київ - 2019

**СИСТЕМА ОПТИМІЗАЦІЇ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ НА ПІДТРИМКУ ТЕМПЕРАТУРИ В РОЗУМНОМУ БУДИНКУ**

За даними офіційного сайту свростатів Європи [1] 64,7% енергії, спожитої в домогосподарствах, витрачається на нагрівання житлового простору. Тому розробка методів, спрямованих на зниження споживання енергії, залишається важливим завданням. Енергоефективність досягається шляхом підвищення ізоляції за рахунок використання кращих матеріалів або використанням технології розумного будинку, коли користувач може самостійно керувати всіма системами або ж будинок автоматично налаштовує їх роботу відповідно до показників температури та побажань користувача. Однак користувач стикається з проблемою постійного моніторингу систем в розумному домі, або будинок працює за задалегідь заданим алгоритмом без постійного оновлення температурної моделі. Для побудови цієї моделі використовують два підходи: 1) на основі математичних розрахунків; 2) на основі машинного навчання. Перший метод має недоліки: 1) часові залежності не моделюються; 2) велика похибка передбачення [2]. У той же час, алгоритми машинного навчання на прикладі кількох комерційних реалізацій показали широке практичне застосування машинного навчання в області систем HVAC. Тому було прийнято рішення використати алгоритми регресії для прогнозування споживання енергії у розумному будинку, тобто впровадити розумність в опалення розумного будинку.

Для вирішення цієї задачі було створено застосунок, який аналізуватиме дані показників і витрат температури в будинку для передбачення майбутніх витрат енергії приладами опалення і вибрати найкращий варіант для опалення протягом дня. Для симуляції роботи приладів у будинку використовується програмний комплекс для моделювання та симуляції складних систем MECSYCO (Multi-agent Environment for Complex SYstem CO-simulation), який використовує мульти-агентну архітектуру для інтеграції різних компонентів в симуляцію [3].

Для реалізації даної системи було вирішено використовувати кросплатформену мову програмування Java, кількість і зручність бібліотек якої дозволить виконати всі розрахунки і реалізувати алгоритм передбачення часу встановлення необхідної температури. При розробці було використано бібліотеку weka.jar, що містить реалізацію більшої кількості існуючих класичних методів машинного навчання регресії і кластеризації (метод опорних векторів, випадковий ліс, k-середніх і т.д.) [4].

Завдяки даному програмному забезпеченню, заснованому на методі алгоритмів машинного навчання, будинок може прогнозувати кількість енергії, необхідної для опалення, вибираючи найоптимальніший відповідно до витрат і побажань користувача.

**Перелік посилань:**

1. Energy consumption in households [Electronic resource]. — Access mode: [https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Energy\\_consumption\\_in\\_households#Energy\\_consumption\\_in\\_households\\_by\\_type\\_of\\_end-use](https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Energy_consumption_in_households#Energy_consumption_in_households_by_type_of_end-use).
2. Y.Wen, B.Burke, "Real-time Dynamic House Thermal Model Identification for Predicting HVAC energy consumption" [Electronic resource]. — Access mode: [https://www.billstron.com/documents/GreenTech13\\_YichengWen.pdf](https://www.billstron.com/documents/GreenTech13_YichengWen.pdf).
3. MECSYCO [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://mecsyc.com/>.
4. Weka forecasting API [Electronic resource]. — Access mode: <https://wiki.pentaho.com>.

поверхні засобами полікоординатних відображень.	62
<i>РОМАНОВА Д.П., мол. вчений</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Сидоренко Ю.В.</i>	
Реалізація підсистеми моделювання розповсюдження лісової пожежі.	63
<i>АНТОНЮК К.В., мол. вчений гр.</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Сидоренко Ю.В.</i>	
Займенники в українському корпусі проекту Universal Dependencies.	64
<i>ДУДНИК В.Ю., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Стативка Ю.І.</i>	
Формування релевантних запитів для збільшення конкурентоспроможності на прикладі графічних систем.	65
<i>ОПЕЙДА Р.А., магістрант гр. ТР-71мн</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Аушева Н.М.</i>	
Модифікація алгоритму політочкових перетворень.	66
<i>ГУМЕНЮК Л.М., магістрант гр. ТВ-61мн</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Сидоренко Ю.В.</i>	
Система оптимізації витрат енергії на підтримку температури в розумному будинку.	67
<i>ВІЛЬДА Д.О., магістрант гр. ТР-81мн</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Михайлова І.Ю.</i>	
Система керування командними проектами на базі Office 365	68
<i>ШКОЛЯР М.В., магістрант гр. ТР-81мн</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Тихоход В.О.</i>	
Визначення об'ємної витрати газу через пальники сушильної печі.	69
<i>САПЕЛЮК Р. В., магістрант гр. АВАУ-11, к.т.н., доц. МАТІКО Г.Ф.</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Матіко Ф.Д.</i>	
Система планування дипломного проектування на базі Microsoft Office 365.	70
<i>ЗАВІСТОВСЬКА А.І., магістрант гр. ТМ-81мн</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Тихоход В.О.</i>	
Моделювання порцій на основі ізотропних кривих Без'є.	71
<i>ДОРОЩУК Д.В., магістрант гр. ТР-81мн</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Аушева Н.М.</i>	
Підсистема інтелектуального асистування редактора природномовних текстів.	72
<i>ГОЛЬДИЧ Я.С., магістрант гр. ТВ-81мн</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Стативка Ю.І.</i>	
Компонент рефакторінгу в інтегрованому середовищі розробки Visual Studio .	73
<i>СТЕПАНЮК А.В., студент гр. ТР-51</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Тихоход В.О.</i>	
Система розпізнавання голосової активності в звуковому сигналі в реальному часі.	74
<i>СКИТЕНКО Р.В., студент гр. ТР-52</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Стативка Ю.І.</i>	
Адаптація акустичної моделі до особливостей звукового сигналу.	75
<i>СЕХІН О.П., студент гр. ТР-52</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Стативка Ю.І.</i>	
Інтеграція динамічної бібліотеки математичних розрахунків з веб-сервісом Node.js.	76
<i>ПІДДУБНЯК А.В., студент гр. ТР-52</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Демчишин А.А.</i>	

# **ДОДАТОК Б**

## **Моделювання температурного режиму в зв'язаних приміщеннях**

Акт впровадження

УКР.НТУУ “КПІ”.ТР32269\_19М

Аркушів 2

2019

"Затверджую"

Директор ТОВ "ІТ-ТРАНЗИТ"

Михайло Ахметов Григоренко

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дипломної роботи магістра Вільди Д.О.  
на тему "Моделювання температурного режиму в та'каних приміщеннях",  
яка виконана в Національному технічному університеті України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
«20 травня» 2019 р.

Нами, представниками кафедри автоматизації проєктування енергетичних процесів і систем "КІП ім. Ігоря Сікорського" та ТОВ "ІТ-ТРАНЗИТ", даний акт складено про те, що для використання в розробках спеціалізованого програмного забезпечення ТОВ "ІТ-ТРАНЗИТ" прийняті результати магістерської роботи Вільди Д.О., а саме: програмне забезпечення для моделювання температурного режиму в та'каних приміщеннях.

Представник кафедри АПЕПС  
НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського"  
Керівник дипломної роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Михайло І.О.

(прізвище та ініціали)

Представник ТОВ  
"ІТ-ТРАНЗИТ"

Директор

(підпис)

Михайло А.Г.

(прізвище та ініціали)

